



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
**INGENIERÍA DE
EDIFICACIÓN**



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL EFECTO DE LOS DISTINTOS TIPOS DE FIBRAS EN EL COMPORTAMIENTO POST FISURA DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS

Modalidad: Científico-Técnico

PROYECTO FINAL DE GRADO

JULIO 2013

Presentado por:

Rodríguez Lozano, José Juan

Segura Vicent, Elena

Directores:

Manuel Pascual Guillamón

Pedro Serna Ros

Marta Roig Flores

Titulación:

Grado en Arquitectura Técnica

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	4
1.1	CONCEPTOS BÁSICOS HRF	4
1.2	PROPIEDADES Y CARACTERIZACIÓN	6
1.3	TIPIFICACIÓN DE LOS HORMIGONES REFORZADOS CON FIBRAS	7
1.4	RESISTENCIAS MECÁNICAS DEL HRF	8
1.5	VENTAJAS DEL HRF.....	10
2	RESEÑA HISTÓRICA DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS	12
3	OBJETIVOS INICIALES.....	15
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA.....	16
4.1	INTRODUCCIÓN.....	16
4.2	MATERIALES	16
4.2.1	Cemento.....	16
4.2.2	Agua	16
4.2.3	Áridos	17
4.2.4	Filler.....	17
4.2.5	Aditivos	18
4.2.6	Fibras.....	19
4.3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	23
4.3.1	Dosificación	23
4.3.3	Hormigón de referencia	24
4.3.4	Modificación del HRF para añadir fibras.....	27
4.4	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	28
4.4.1	Fabricación de probetas cilíndricas y prismáticas.....	28
4.4.2	Curado de las probetas	31
4.4.3	Programa de ensayos.....	32
5	RESULTADOS TRAS EL ENSAYO EN EL LABORATORIO DE LAS PROBETAS	38
5.1	RECuento DE FIBRAS TRAS SU ROTURA	38
5.2	RESULTADOS A FLEXOTRACCIÓN	39
5.2.1	Resultados de probetas sin fibras	39
5.2.2	Resultados de probetas con fibras metálicas	39
5.2.3	Resultados de probetas con fibras de plástico	44

5.2.4	Resultados de probetas con fibras de vidrio.....	48
5.3	RESULTADOS A COMPRESIÓN.....	50
6	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	57
7	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	63
7.1	Conclusiones	63
7.2	Futuras líneas de investigación	64
8	ESTUDIO PRESUPUESTARIO	65
9	BIBLIOGRAFÍA	68
10	ANEJO DE GRÁFICOS.....	69
10.1	FIBRAS METÁLICAS 65/35	69
10.2	FIBRAS METÁLICAS 80/35	71
10.3	FIBRAS PLÁSTICAS ENDURO 600	74
10.4	FIBRAS PLÁSTICAS SIKA-FIBER M-48	77
10.5	FIBRAS DE VIDRIO	80
11	ANEJO DE NOMENCLATURA.....	84
12	AGRADECIMIENTOS.....	85

1 INTRODUCCIÓN

1.1 CONCEPTOS BÁSICOS HRF

Los hormigones y morteros de cemento tienen como característica principal su elevada resistencia a compresión, pero escasa resistencia a tracción. Dichos hormigones y morteros son reforzados con armaduras convencionales de acero para soportar esfuerzos de tracción, generando un refuerzo continuo de gran efectividad y utilidad en la construcción de estructuras para edificación y obra civil.

Según el ACI 116R-00, el hormigón reforzado con fibras es una combinación de cemento hidráulico, agua, áridos finos y gruesos, aditivos, adiciones y fibras dispersas orientadas aleatoriamente.

Las fibras pueden ser naturales o artificiales según su naturaleza y tienen como fin reforzar la masa del hormigón incrementando la resistencia a la tracción disminuyendo la fisuración y aumentando la tenacidad mediante la transmisión de esfuerzos a través de la sección fisurada. Por otro lado la adición de fibras disminuye los efectos de la retracción por fraguado y aumenta la resistencia al impacto y la resistencia a la fatiga.

La norma ASTM C 1116 define las fibras como: “Filamentos finos y alongados en forma de haz, malla o trenza, de algún material natural o manufacturado que pueda ser distribuido a través de una mezcla de hormigón fresco.”

A su vez, la norma ACI 544 considera como fibras para el hormigón los filamentos discontinuos de acero, las fibras sintéticas, las de vidrio y las naturales.

Además de las normas americanas, anteriormente mencionadas, en el ámbito europeo encontramos las Normas UNE EN. Entre las cuales cabe destacar las siguientes:

UNE EN 14845-1: “Métodos de ensayo para fibras para hormigón. Parte 1: Homigones de referencia.”

UNE EN 14845-2: “Métodos de ensayo para fibras para hormigón. Parte 1: Efecto en la resistencia del hormigón.”

UNE EN 14889-1: “Fibras para hormigón. Parte 1: Fibras de acero. Definiciones, especificaciones y conformidad.”

UNE EN 14889-1: “Fibras para hormigón. Parte 1: Fibras poliméricas. Definiciones, especificaciones y conformidad.”

UNE EN 12390-3: “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.”

UNE EN 12390-5: “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas.”

UNE EN 14651: “Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual).”

A efectos del Anejo 14 de la EHE-08, los hormigones reforzados con fibras (HRF), se definen como aquellos hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa.

Mediante el avance progresivo de la tecnología se ha logrado crear una gran cantidad de materiales sintéticos, siguiendo la idea de reforzar los materiales constructivos, similar a la observada en el adobe, y así dar refuerzo discontinuo a hormigones y morteros.

Las cantidades por volumen usadas de fibras en el hormigón varían dependiendo del tipo de fibra y de la finalidad del hormigón.

Las fibras son elementos de corta longitud y pequeña sección que se incorporan a la masa del hormigón a fin de conferirle ciertas propiedades específicas.

De una manera general se pueden clasificar como fibras estructurales, aquellas que proporcionan una mayor energía de rotura al hormigón en masa o fibras no estructurales, a aquellas que sin considerar en el cálculo esta energía suponen una mejora ante determinadas propiedades como por ejemplo el control de la fisuración por retracción, incremento de la resistencia al fuego, abrasión, impacto y otros. (Anejo 14. EHE-08).

Las características geométricas de las fibras (Longitud (l_f), Diámetro equivalente (d_f), Esbeltez (λ)), se establecerán de acuerdo con UNE 83500-1 y UNE 83500-2. (Anejo 14. EHE-08).

De acuerdo con su naturaleza las fibras se clasifican en:

- Fibras de acero.
- Fibras poliméricas.
- Otras fibras orgánicas.

Se define además la longitud crítica, L_c , como la longitud de la fibra que cumple las siguientes hipótesis. Si, $L < L_c$, la fibra saldrá de la matriz por falta de adherencia y si por lo contrario, $L > L_c$, la fibra fallará por tracción. La adherencia es mayor en fibras de superficie rugosa que presenten extremos agrandados. La orientación de la fibra también es un factor importante para su efectividad siendo máximo el beneficio cuando la fibra está posicionada y paralelamente al esfuerzo de tracción aplicado y es de menor influencia cuando se orientan al azar en tres dimensiones.

Las fibras de acero, en dosificaciones que oscilan entre 2% y 0,25 en volumen de hormigón, han mostrado dar al hormigón mejoras en la resistencia, flexotracción y una mayor ductilidad cuando el mismo está solicitado a compresión, así como importantes beneficios en caso de impacto.



Figura 1.1. Fibras de acero convencional

Un hormigón reforzado con fibras puede soportar cargas de flexión mayores que aquella en la cual aparece la primera fisura en la matriz, incrementando además su tenacidad entendida como la capacidad que posee el hormigón de soportar carga (área bajo la curva carga-deformación).

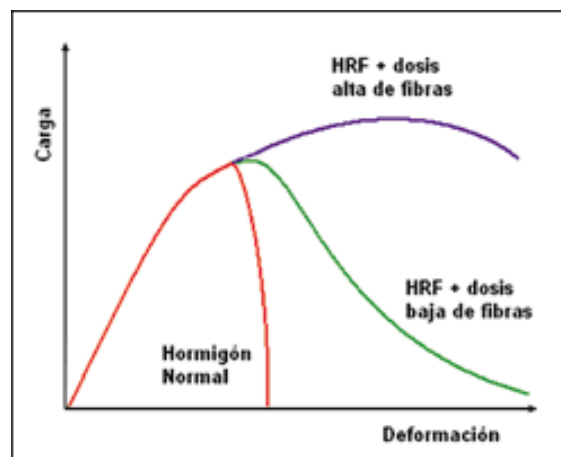


Figura 1.2. Curva típica Carga-Deformación en hormigón reforzado con fibras

En los últimos cuarenta años han salido al mercado una gran variedad de fibras sintéticas entre las que se pueden mencionar las fibras acrílicas, de carbono, de poliéster, de vidrio, de polietileno, de nylon, de polipropileno, entre otras.

1.2 PROPIEDADES Y CARACTERIZACIÓN

Las propiedades destacables del hormigón reforzado con fibras en estado fresco son la consistencia, docilidad y la homogeneidad, como cualquier hormigón.

Se define como consistencia o “cohesión” a la aptitud de un hormigón para conservar las posiciones relativas de sus componentes en estado fresco. La docilidad es la propiedad del hormigón fresco que define la aptitud de un hormigón para admitir deformaciones plásticas, adaptándose a la forma del molde, bajo determinadas condiciones de compactación sin perder su homogeneidad.

En referencia a la homogeneidad del hormigón fresco éste se considera homogéneo cuando en cualquier parte de su masa la composición es similar. En hormigones reforzados con fibras, la homogeneidad se puede ver afectada por tres causas fundamentales:

1. Segregación de los componentes: El riesgo de segregación aumenta si se incrementa el tamaño máximo del árido, se adopta una granulometría discontinua o se dispone un volumen insuficiente de pasta de cemento.
2. Exudación: Se produce cuando el volumen de agua empleada en el amasado es superior al que el cemento y los áridos (en particular la fracción fina) son capaces de retener por absorción y adsorción.
3. Formación de bolas o erizos: Se produce por una concentración local de fibras entrecruzadas o enmarañadas.

Existen distintos métodos de ensayo y control de calidad del HRF. Podemos encontrar ensayos para la medida de: la consistencia, la flexotracción, la tenacidad a compresión, la resistencia a compresión, índice de tenacidad, resistencia a cortante, del contenido de fibras de acero, de la resistencia a punzonamiento sobre placa y para el control del hormigón.

1.3 TIPIFICACIÓN DE LOS HORMIGONES REFORZADOS CON FIBRAS

El Anejo 14 de la EHE-08 tipifica los hormigones de acuerdo con el siguiente formato:

T-R / f- R1-R3 / C / TM-TF / A

dónde:

T: indicativo que será HMF en el caso de hormigón en masa, HAF en el caso de hormigón armado y HPF en el caso del hormigón pretensado.

R: resistencia característica a compresión especificada, en N/mm².

f: Indicativo del tipo de fibras que será A en el caso de fibras de acero, P en el caso de fibras poliméricas y V en el caso de fibra de vidrio.

R1, R3: resistencia característica residual a flexotracción especificada $f_{R,1,k}$ y $f_{R,3,k}$, en N/mm².

C: letra inicial del tipo de consistencia.

TM: tamaño máximo del árido, en mm.

TF: longitud máxima de la fibra, en mm.

A: designación del ambiente.

En cuanto a las resistencias residuales a flexotracción características especificadas, han de seguir la siguiente serie:

1,0 - 1,5 - 2,0 - 2,5 - 3,0 - 3,5 - 4,0 - 4,5 - 5,0- ...

Las anteriores cifras indican las resistencias residuales a flexotracción características especificadas del hormigón a 28 días, expresadas en N/mm².

Cuando las fibras no tengan función estructural los indicativos R1 y R3 deberán sustituirse por: “CR” en el caso de las fibras para control de retracción, “RF” en el caso de fibras para mejorar la resistencia al fuego y “O” en otros casos. En el caso de hormigones designados por dosificación se recomienda el siguiente formato:

$$T - D - G/f/C/TM/A$$

dónde:

G: es el contenido de fibra, en kg/m³ de hormigón, prescrito por el peticionario. En este caso deberá garantizarse que el tipo, dimensiones y características de las fibras coincidan con los indicados en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.

1.4 RESISTENCIAS MECÁNICAS DEL HRF

La resistencia del HRF se refiere a la resistencia de la unidad de producto o amasada y se obtiene a partir de los resultados de ensayo de rotura a flexotracción, en número igual o superior a tres, realizados sobre probetas prismáticas de ancho igual a 150 mm, altura igual a 150 mm y largo igual a 600 mm, de 28 días de edad, fabricadas, conservadas y ensayadas de acuerdo con UNE-EN 14651 (EHE-08, 2008).

Cuando el elemento a diseñar tenga un canto inferior a 12,5 cm, o cuando el hormigón presente endurecimiento a flexión, con resistencia residual a flexotracción $f_{R,1d}$ superior la resistencia a tracción $f_{ct,d}$, se recomienda que las dimensiones de la probeta, y el método de preparación se adapten para simular el comportamiento real de la estructura, y el ensayo se realice en probetas no entalladas.

Al efecto de asegurar la homogeneidad de una misma unidad de producto, el recorrido relativo de un grupo de tres probetas (diferencia entre el mayor resultado y el menor, dividida por el valor medio de las tres), tomadas de la misma amasada, no podrá exceder el 35%.

Los criterios planteados en la EHE-08 para obtener el valor de la resistencia a tracción $f_{ct,tr}$ a partir de los resultados del ensayo de tracción indirecta son válidos siempre que se refieran al límite de proporcionalidad.

En sollicitaciones de compresión, el diagrama tensión-deformación del hormigón con fibras no se modifica respecto al del articulado de la EHE-08, ya que se puede considerar que la adición de las fibras no varía de forma significativa el comportamiento del hormigón en compresión. El Comité 544 de la ACI (1988), asegura también que la adición de fibras de acero en el hormigón suele producir incrementos o descensos poco significativos de la resistencia a compresión del material.

Aplicando el esfuerzo de compresión en dirección paralela a la de hormigonado la resistencia es mayor que aplicando el esfuerzo a la dirección ortogonal (Bonzel, 1986).

Del ensayo propuesto en UNE-EN 14651 se obtiene el diagrama carga-abertura de fisura del hormigón. A partir de los valores de carga correspondiente al límite de proporcionalidad (FL) y a las

aberturas de fisura 0,5mm y 2,5mm (F1 y F3 respectivamente), se obtiene el valor de resistencia a flexotracción ($f_{ct,fl}$) y los valores de resistencia residual a flexotracción correspondientes: f_{R1} y f_{R3} (Anejo 14. EHE-08).

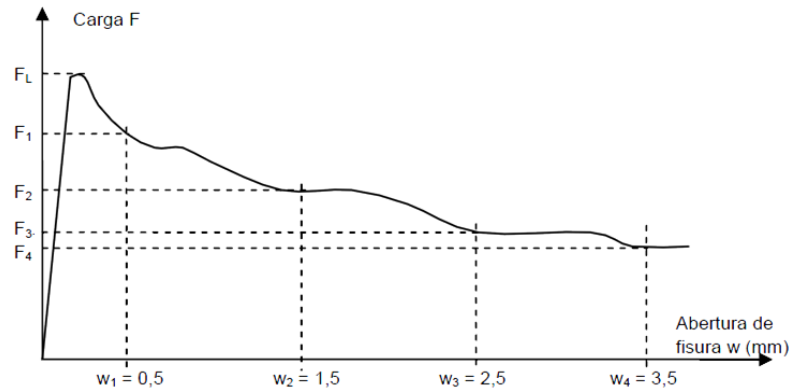


Figura 1.3. Diagrama tipo carga abertura de fisuras. Figura A14.1. EHE-08

En el hormigón sin fibras hay una primera fase prácticamente elástica, seguida de una microfisuración de la matriz que conduce rápidamente a la rotura frágil del material. Con fibras, según el tipo y volumen de éstas, el comportamiento puede ser muy distinto (Absi, 1994):

1. Fase casi lineal: Esta fase es previa a la microfisuración de la matriz, y resulta muy similar a la del hormigón sin fibras.
2. Fase curva ascendente: Se trata de la fase en la cual el hormigón se fisura y las fibras comienzan a traccionarse.
3. Rama descendente: En la que el esfuerzo es soportado por las fibras que cosen las fisuras.

Los mayores efectos de las fibras sobre el hormigón en los referente a la resistencia a compresión son un incremento significativo de la deformación correspondiente a la máxima tensión de compresión aplicada (ACI Comité 544, 1988 a) y una pendiente bastante menor de la rama descendente (Kosaka, 1985). Ello confiere al material compuesto mayor tenacidad, creciente con el volumen de fibras empleado (Craig, 1984) (Otter, 1986).

La tenacidad del HRFA convencional disminuye (Kosaka, 1985) cuando:

- a) Se aplica la carga en dirección ortogonal a la de vertido del hormigón.
- b) Se aumenta la esbeltez de las probetas.
- c) Se reduce la esbeltez de las fibras y, así, su resistencia al arrancamiento o *pull-out*.
- d) Disminuye la resistencia de las fibras, especialmente cuando estas presentan una esbeltez elevada.

En cuanto a la resistencia a tracción decir que, la adición de fibras de acero convencional modifican, en tracción directa, el diagrama tensión-deformación del HRFA, provocando una caída brusca de la carga al fisurarse el mismo, pero por otro lado la rama descendente presenta una pendiente mucho menor donde la resistencia residual es aportada por las fibras ancladas a los laterales de las fisuras.

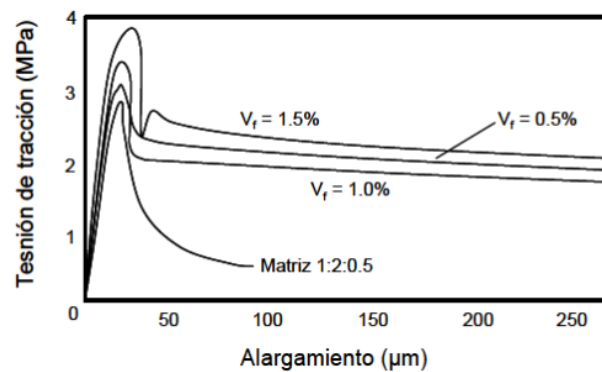


Figura 1.4 Diagrama Tensión vs. Alargamiento

Por otro lado, es de común aceptación que la adición de fibras al hormigón no conlleva un incremento significativo de la resistencia del hormigón a compresión. Suelen producirse ligeros incrementos o decrementos de la misma.

En hormigones jóvenes (antes de los 28 días) la capacidad de mantener la carga máxima a compresión se incrementa significativamente con la adición de fibras, a medida que madura el hormigón este incremento se reduce y la capacidad de absorción de energía y la ductilidad se concentran principalmente en la región post-fisura.

Cuanto menor es el tamaño de las probetas se obtienen mayores resistencias a compresión, debido a que se acentúa un alineamiento preferente de las fibras. El efecto se hace mucho más sensible a medida que se aumenta la longitud de la fibra (ACI 544.3R- 08, 2008). Probetas con mayor esbeltez soportan tensiones sensiblemente mayores, pero presentan respuestas menos dúctiles a compresión.

1.5 VENTAJAS DEL HRF

Las ventajas más destacadas de la adición de fibras de acero a un hormigón armado tradicional son las siguientes:

- En un hormigón armado tradicional, para la ejecución de cualquier elemento estructural hay que tener en cuenta los recubrimientos. Mientras que, en un hormigón reforzado esto no es necesario. Por tanto, los espesores son más reducidos porque aumenta la sección eficaz ya que no hace falta tener en cuenta dichos recubrimientos.
- Ahorro en materiales, como separadores, debido a la eliminación de recubrimientos.
- Aumento de las resistencias a la tracción, a la flexión y al cortante.
- Alta resistencia al agrietamiento y al impacto.
- Gran capacidad para soportar cargas.
- Mayor resistencia a la abrasión.
- Asegura un refuerzo homogéneo y tridimensional más eficaz.
- Mayor estanqueidad y resistencia a la congelación.
- Mayor capacidad de adherencia.
- Mejora el comportamiento y estabilidad de las juntas.

- Permite reducir el número de juntas de retracción.
- Ahorro de tiempo y dinero en su colocación en comparación a la malla de acero.
- Sustitución del mallazo, eliminando los riesgos de una mala colocación.
- Incrementa la ductilidad y tenacidad del hormigón, produciendo un aumento de la capacidad importante.
- Logra alta resiliencia (capacidad de absorción de energía en el impacto) y resistencia al impacto para sollicitaciones dinámicas.
- No requiere de bomba, dado que se puede realizar el hormigonado directamente desde el camión.
- De fácil integración al hormigón, tanto en planta como a pie de obra.
- Si fuese necesario, bombeable incluso con altas dosificaciones. No requiere de tratamientos especiales.
- Ahorro en: costos directos ya que el costo de la fibra equivale a un 50% del costo directo de la malla (contando mano de obra), en el hormigón utilizado ya que las fibras permiten aplicar el espesor requerido en toda la superficie, independiente de las irregularidades del sustrato y el debido a la disminución del rebote provocado por la malla de refuerzo.
- Es compatible con todo tipo de cemento y mezclas de hormigón.
- Se aplican las técnicas tradicionales de extendido y acabado.
- Es compatible con todos los compuestos de curado, súper plastificantes, reductores de agua medios o altos, endurecedores y selladores.
- Reducción notable de las fisuras.
- El refuerzo homogéneo con fibras permite resistir esfuerzos de flexotracción en cualquier punto de la capa de hormigón.
- Son más vulnerables a la corrosión que el hormigón armado convencional, aunque su comportamiento es muy bueno si no hay fisuración. Cuando el ambiente es agresivo el hormigón tiende a fisurarse por lo que es imprescindible el uso de acero inoxidable.

Cabe decir que, en contrapartida a las ventajas que produce la adición de fibras en el material endurecido, su inclusión en la masa de hormigón fresco reduce su trabajabilidad, efecto parcialmente paliado por los aditivos químicos.

Otros aspectos a los que también se les debe prestar una especial atención son la posible alteración de las fibras durante el mezclado, la orientación final de las mismas, conseguir una adecuada compacidad y el acabado de las superficies.

2 RESEÑA HISTÓRICA DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS

El hormigón es un material compuesto por una mezcla en una cierta dosificación de materiales de diferentes características (agua, áridos, cemento, fluidificantes, etc.) que trabaja de manera excelente a compresión pero mal a tracción.

Se dice que los primeros hormigones eran pequeñas muestras de material aparecidos 5000 años a.c con resistencia suficiente para ser considerado estructural. También aparecieron hormigones en Grecia, mezcla de caliza calcinada con agua y arena, mezcladas con tejas rotas o piedras trituradas, y Roma con el Opus Caementicium u hormigón Romano (del latín = *caementum*: escombros, piedra en bruto) mezcla de mortero de cal, arena, cenizas volcánicas y piedras de escombros, que se empleaba para construcción de muros y arcos por su velocidad de ejecución y solidez.

Es en el siglo XX cuando se generalizó su uso tal y como lo conocemos hoy en día. A pesar de ser un material con un buen comportamiento en general, su baja resistencia a tracción ha supuesto una limitación a su uso en ciertos ámbitos.

Se ha tratado de investigar profundamente en este aspecto desde hace siglos hasta el día de hoy aplicando fibras de diferentes materiales y también armaduras en la fabricación de hormigón armado para mejorar su isotropía.

El hormigón armado nació en el siglo XIX gracias a Joshep Monier y posteriormente a François Hennebique. Monier era un jardinero sin conocimientos técnicos que ideó un sistema combinado de hormigón con mallas de alambre para construir depósitos y macetas patentado en 1867. El sistema tuvo buena acogida y lo aplicó a puentes de mediana luz y edificios basándose en la experiencia, sin rigor científico estricto. Los industriales alemanes Wayss y Freytag en 1885 compraron sus derechos y dotaron al sistema de formulación racional alcanzando un desarrollo más completo. Viendo este éxito, el contratista franco-belga patentó un sistema en 1886 en Bélgica se trataba de un sistema de forjado tubular reforzado con elementos de hierro para luego aplicarlo a puentes, cimentaciones, pilotes, pilares. Se rodeó de un equipo muy competente y su expansión fue vertiginosa tanto en Europa como en Egipto, Estados Unidos o México.

Paralelamente, para solventar el problema de la baja resistencia a tracción del hormigón, históricamente encontramos varias referencias de la adición de fibras con función estructural.

Como antecedente histórico lejano en la antigua Caldea armaban de paja adobes de barro cocidos al sol y la civilización egipcia, que mezclaba pelos de caballo en el mortero y la paja en los ladrillos.

Cabe destacar también al principio del siglo XX el empleo del asbesto en el hormigón, más conocido como amianto. El fibrocemento era la mezcla de pasta de cemento con un 16 % de fibras de asbesto para incrementar la resistencia a flexotracción de 2 a 4 veces la de la matriz. El asbesto tenía como características las fibras largas, muy resistentes, separables y flexibles, resistente a las llamas y las altas temperaturas, aislantes.

Se usó en múltiples productos de la construcción (tejas de recubrimiento, baldosas, azulejos, productos de cemento). Su uso se prohibió debido al informe de organismos internacionales que indicaron que provocaban cáncer altamente mortal.

Hoy en día, se emplean las fibras metálicas, poliméricas o de vidrio.

En las metálicas, el antecedente más lejano contrastado lo encontramos en 1911, donde Graham las incorporó al hormigón para mejorar la resistencia y la estabilidad. Gracias a William Ficklin, salió en 1914 la primera patente en Estados Unidos, que consistió en añadir virutas metálicas al hormigón para resistir al desgaste.

En los años 60 también en Estados Unidos, James Romualdi hizo ya de manera profunda estudios científicos sobre los efectos de añadir fibras cortas al hormigón.

El ACI (American Concrete Institute) creó varios comités con la finalidad de normalizar su uso extendido en la industria de la construcción.

En nuestro país, se incorporó en los 70 para pavimentos industriales, puertos, revestimientos de túneles, prefabricados. Proporcionan al hormigón mejoras en el comportamiento a flexotracción, aumento de resistencia a tracción, incremento de resistencia a rotura, control de la fisuración, resistencia al choque e impacto, mejora de adherencia de las barras de armado tradicional y mayor ductilidad.

En hormigones estructurales, estas fibras proporcionan mayor energía de rotura, mejora de la durabilidad y posibilidad de evitar refuerzo de armaduras. Por el contrario, para usos no estructurales mejoran propiedades como la abrasión, fisuración por la retracción o el impacto.

La inclusión de fibras ha alcanzado un alto nivel de importancia. Debido a ello, en la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08. Anejo 14) hace referencia mediante nomenclatura propia y recomendaciones.

En cuanto a tamaño, la EHE-08 distingue entre las micro-fibras, con un diámetro menor a 0,3 mm, cuyos usos principales son pavimentos y soleras, sin tener función estructural, su objetivo es evitar fisuras por retracción plástica y/o para mejorar resistencia al fuego y las macro-fibras, de diámetros iguales o mayores a 0,3 mm, que colaboran estructuralmente, destacando sus características físico-químicas con longitud variable de 20 a 60 mm. El uso de fibras resulta conveniente para aligerar cantidad de acero en estructuras, ya que se colocan dispersas en todo el volumen del hormigón.

En elementos prefabricados se emplea en la construcción de tuberías mejorando la impermeabilidad. En construcción industrializada la utilización de las fibras permite reducir el espesor de las paredes evitando la presencia de armaduras tradicionales incluso en dinteles de puertas y ventanas. En pavimentos el uso cada vez es mayor, dónde la resistencia a flexotracción es importante, mejorando el impacto y reduciendo el número de juntas.

Por último nos encontramos con las fibras de polipropileno. Los primeros estudios en este tipo de fibras se iniciaron en los años 60 en Estados Unidos. La armada consideró que era el material sintético más apropiado para usar en el hormigón por ser químicamente inerte, no producir corrosión interna, ser

estables y resistir a los ácidos minerales, básicos y sales orgánicas. En 1982 Industrias sintéticas Ind. , la segunda compañía productora de polipropileno adquiere la patente y nace Fibermesh.

Se aplica como sustituto de malla electrosoldada por temperatura en hormigones, mejorando las siguientes propiedades: disminuye la permeabilidad, aporta resistencia al impacto, reduce corrosión en medios agresivos, aporta mayor resistencia a la fatiga y controla el agrietamiento.

Posteriormente aparecen las fibras de vidrio (GFRC, *Glass reinforced concrete*). Los primeros datos sobre ellas nos llevan al año 1940 en Rusia usándose en cerramientos de fachada para intentar reducir el grosor de los paneles, y así aligerar su peso al sustituir el refuerzo de acero que llevaban. Otra teoría sobre este uso es que se intentó sustituir el acero para usarlo en la fabricación de armas en la segunda guerra mundial. La finalidad de los paneles es que fueran vistos, el hormigón que se emplea es blanco y la arena de tamaño fino. También con bajo contenido de álcalis ya que reacciona. Se desarrollaron en Gran Bretaña las fibras AR resistentes al Alkali y en 1971 comienza su masiva comercialización.

En esta etapa no se obtuvieron los resultados esperados, se vio que perdía a los 10 años su resistencia a tracción.

En 1985 Pilkington saca al mercado las fibras de vidrio CEM-FIL-2 con recubrimiento de polihidroxifenoles y soluciona los problemas anteriores.

Hoy día se suele usar además en tuberías, depósitos, paredes, puertas, tejas mobiliario urbano, prefabricados, reparaciones, pavimentos, encofrados.

3 OBJETIVOS INICIALES

La finalidad de este proyecto es conocer y comparar el comportamiento del hormigón reforzado con distintos tipos de fibras, sometido a ensayos de compresión y flexotracción para determinar su resistencia residual.

Los objetivos que se pretenden alcanzar son los siguientes:

- Dosificación y ajuste, a partir de un hormigón de referencia, de hormigones reforzados con distintos contenidos y tipos de fibras.
- Análisis del efecto y contenido de fibras metálicas, plásticas y de vidrio sobre la resistencia a flexotracción.
- Análisis de la resistencia característica obtenida a partir de ensayos a compresión.
- Obtención de las resistencias residuales de cada una de las distintas amasadas en función del tipo y contenido de fibras.
- Realización de un análisis comparativo que nos permita determinar la resistencia estructural aportada por las fibras al hormigón.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA

4.1 INTRODUCCIÓN

En este trabajo se pretende analizar el esfuerzo frente a esfuerzos de compresión y flexotracción de elementos estructurales prefabricados con hormigón reforzado con fibras (HRF), utilizando fibras de distintos materiales, como son las fibras de acero, de plástico y de vidrio.

Para conocer el comportamiento de dichos elementos se han fabricado en el laboratorio probetas cilíndricas (\varnothing 15 cm, h = 30 cm) y prismáticas (10x10x50 cm) con un hormigón de las mismas características (Hormigón de Referencia) en cada una de ellas, con un contenido en fibras variable siempre teniendo en cuenta las limitaciones del fabricante.

Con ello se pretendía realizar un estudio experimental y comparativo de las resistencias residuales obtenidas, después de realizar los ensayos, comparando siempre con un hormigón de referencia.

4.2 MATERIALES

Los hormigones reforzados con fibras están constituidos esencialmente por los mismos componentes que un hormigón tradicional y adicionalmente fibras de acero. La inclusión de las fibras, además de alterar el comportamiento del hormigón en estado endurecido, también lo hace en estado fresco, por lo que a algunos de los componentes se les exigen condiciones que en los hormigones tradicionales no son necesarias.

En función de la cantidad de fibras que se van a adicionar al hormigón y de la geometría de éstas, el material compuesto tendrá que sufrir ciertas modificaciones respecto de un hormigón tradicional. Estas modificaciones pasan principalmente por una limitación en el tamaño máximo del árido, menores valores de relación grava-arena, mayores cantidades de aditivos reductores de agua, y mayor demanda de finos, entre otros.

4.2.1 Cemento

El cemento es un componente decisivo en la docilidad del material en estado fresco y, posteriormente, en las características mecánicas del hormigón endurecido. Se puede emplear cualquier cemento que cumpla con los requisitos establecidos para un hormigón tradicional, siempre que sea capaz de proporcionar al hormigón las características que exige el proyecto.

4.2.2 Agua

Se puede emplear agua que cumpla los mismos requisitos exigidos en el caso de hormigones tradicionales armados, poniendo especial atención a los agentes que puedan afectar a las fibras. La Instrucción EHE 2008 establece, en el Anejo 14, que el aumento de la consistencia debido al uso de las fibras debe ser compensado siempre con la adición de aditivos reductores de agua, sin modificar la dosificación prevista de la misma.

4.2.3 Áridos

Además de cumplir los requerimientos de composición, resistencia, durabilidad, estabilidad y limpieza establecidos para el empleo en hormigones tradicionales, los áridos deben tener unos tamaños de partícula, granulometría y formas adecuadas para la elaboración de un HRF.

Se pueden emplear áridos rodados o machacados, siendo más adecuado el empleo de los primeros (especialmente en la arena) ya que para valores idénticos de relación agua/cemento se obtiene mejor docilidad que con los áridos machacados.

Respecto del contenido de finos, cuando se adicionan fibras de acero es aconsejable incorporar mayor cantidad de finos para reducir el riesgo de segregación, aumentar la cohesión y favorecer la movilidad de las fibras.



Figura 4.1 Áridos empleados

4.2.4 Filler

Atendiendo a la normativa UNE EN 933-2:1996 y UNE EN 933-2:1999, se define como filler, o polvo mineral, la fracción que pasa por el tamiz de 0,063 mm, por lo que tiene una elevada superficie específica.

El filler o polvo mineral puede ser de aportación o de recuperación. El filler de aportación es un producto comercial de naturaleza pulverulenta (cemento o cenizas volantes de central térmica) o un polvo en general calizo.

Cuando se trata de un producto comercial, se garantiza perfectamente su control y se conocen sus propiedades tanto físicas como químicas y su futuro comportamiento en la mezcla. En cambio, cuando se utiliza filler de recuperación, es decir, aquél procedente de la propia trituración de los áridos, no se puede asegurar con certeza y de forma continua sus características y comportamiento en la mezcla, y se debe determinar previamente.



Figura 4.2 Filler

4.2.5 Aditivos

En los HRF se emplean principalmente aditivos reductores de agua (superfluidificantes) y aireantes. El Anejo 14 de la EHE 2008 establece que, cuando las fibras utilizadas sean metálicas, el ión cloruro total aportado por los componentes no debe exceder del 0.4% del peso del cemento.

Al adicionar fibras al hormigón (principalmente en altas proporciones), éste sufre una reducción sustancial de docilidad. Con el fin de no adicionar agua, ni afectar la resistencia y durabilidad esperadas, se emplean superfluidificantes.

De cualquier manera, si se pretende hacer muy fluido un hormigón con un volumen de fibras alto y no se controla adecuadamente la granulometría de los áridos y la distribución de las fibras en el hormigón, puede producirse apelotonamiento de las fibras en erizos.



Figura 4.3 Etiquetado aditivo superplastificante

El aditivo utilizado, como se muestra en la Figura 8, ha sido el Sika Viscocrete 5720, en una dosificación del 0,7% en peso del cemento.

Las características del mismo, según su ficha técnica, son las siguientes:

- Su uso permite a los hormigones cumplir los criterios de autocompactabilidad (HAC).
- Reducción muy importante de agua de amasado (altas resistencias y gran impermeabilidad).
- Altas resistencias iniciales.
- Disminución de la fluencia y retracción.
- La carbonatación es mucho más lenta.

- No contiene cloruros ni sustancias que puedan provocar o favorecer la corrosión del acero y por lo tanto puede utilizarse sin restricciones en hormigones armados o pretensados.
- Apariencia/Color: Líquido marrón amarillento
- Presentación: Contenedores de m3. Bajo pedido puede suministrarse a granel.
- Condiciones de almacenamiento/Conservación: 12 meses, desde su fecha de fabricación en sus envases de origen bien cerrados y no deteriorados. Al resguardo del hielo, entre +5 °C y +35 °C.
- Tipo: Policarboxilato modificado en base acuosa.
- Densidad: Aprox. 1,09 kg/l.
- Contenido de sólidos: Aprox. 36%.
- Valor del pH: Aprox. 4

4.2.6 Fibras

Las fibras a utilizar en el presente Proyecto han sido de acero, plásticas o poliméricas y de vidrio.

El Anejo 14 de la Instrucción EHE 2008 clasifica las fibras de manera general en estructurales y no estructurales, en función de la capacidad de aumentar la resistencia a flexotracción del hormigón. Las fibras serán estructurales si la contribución de las mismas puede ser considerada en el cálculo de la respuesta de la sección de hormigón. Las fibras serán no estructurales en caso contrario.

Las fibras plásticas están formadas por un material polimérico (polipropileno, polietileno de alta densidad, aramida, alcohol de polivinilo, acrílico, nylon, poliéster) extrusionado y posteriormente cortado. Estas pueden ser adicionadas homogéneamente al hormigón, mortero o pasta. Se rigen por la norma UNE 83500-2 y, según el proceso de fabricación se clasifican en: monofilamentos extruidos (Tipo 1), láminas fibriladas (Tipo II).

Las fibras de vidrio podrán emplearse siempre que se garantice un comportamiento adecuado durante la vida útil del elemento estructural, en relación con los problemas potenciales de deterioro de este tipo de fibras como consecuencia de la alcalinidad del medio.

4.2.6.1 Descripción de los tipos de fibras empleados

4.2.6.1.1 Fibras de acero

Las fibras de acero empleadas han sido de dos tipos:

Dramix RC-65/35-BN

Dramix RC-80/35-BN

En la nomenclatura de las mismas, el primero de los valores nos indica la longitud de las mismas en mm, y el segundo valor es la esbeltez.



Figura 4.4 Dramix RC-80/35-BN



Figura 4.5 Dramix RC-65/35-BN

Se trata de fibras de alambre estirado en frío, con extremos conformados y encolado en peines.

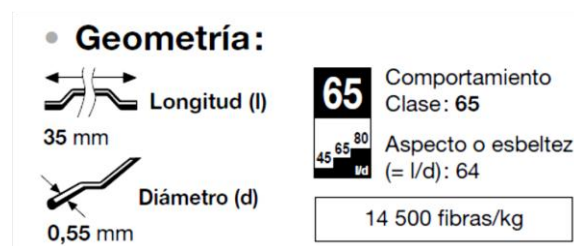


Figura 4.6 Dramix RC-65/35-BN

Se trata de fibras con certificados de aprobación conforma a ASTM A820, y a sistemas de calidad en fábricas belgas, brasileñas y americanas.

Características mecánicas DRAMIX RC-65/35-BN:

- Resistencia a tracción del alambre: mínimo 1100 N/mm².
- Bajo carbono conforme a DIN 17 140-D9; EN 10016-2 – C9D.

Características mecánicas DRAMIX RC-80/35-BN:

- Resistencia a tracción del alambre: mínimo 1050 N/mm².
- Bajo carbono conforme a EN 10016-2 – C9D.

La dosificación utilizada en cada una de las fibras, se expresa en la siguiente tabla:

	12.04.13		19.04.13	
	AM1	AM2	AM1	AM2
Tipo de fibra	Met. 65/35	Met. 65/35	Met. 80/35	Met. 80/35
Kg/m ³	20	15	20	25

Figura 4.7 Dosificación fibras metálicas

4.2.6.1.2 Fibras plásticas

Al igual que en las fibras de acero, en este caso también se han utilizado dos tipos diferentes de fibras plásticas:

ENDURO 600 Propex

Sika Fiber M-48



Figura 4.8 ENDURO 600



Figura 4.9. ENDURO 600



Figura 4.10. Sika Fiber M-48

Las propiedades a continuación indicadas, pertenecen al catálogo:

Características y beneficios:

- Aumenta la resistencia a flexión.
- Aumenta la cohesión y reduce la segregación.
- Aumenta el impacto y resistencia a la rotura.
- No magnético.
- Inoxidable.
- Químicamente inerte.
- Reducción del desgaste en bombas de hormigón y mangueras.
- Seguro y fácil de manejar.
- Económica alternativa a las mallas de acero.

Propiedades químicas y físicas ENDURO 600 Propex:

- Absorción: Nula
- Punto de fusión: 328° F (162° C)
- Gravedad específica: 0,91
- Punto de ignición: 1022° F (> 550° C)
- Longitud de la fibra: 50 mm
- Conductividad Térmica: Baja
- Conductividad Eléctrica: Baja
- Resistencia a la sal y los ácidos: Alta

Propiedades químicas y físicas Sika Fiber M-48:

- Apariencia/Colores: Negro
- Presentación: Bolsas de 4 kg
- Condiciones de almacenamiento/ Conservación: En lugar seco y fresco. Conservación ilimitada.
- Composición química: 100% poliolefinas - HOMOPOLIMERO
- Densidad (20 °C): Aprox. 0,91 kg/l
- Absorción de agua: Nula
- Grosor de fibra: 3500 deniers por filamento.
- Diámetro equivalente: 0,93 mm aprox.
- Longitud de fibra/esbeltez: Longitud 48 mm; Esbeltez 65 mm
- Longitud total: 2.250 mts/kg de fibra.

- Frecuencia de la fibra (longitudes de 48 mm): 46.875 ud/kg.
- Frecuencia de la fibra (longitudes de 36 mm): 62.500 ud/kg.
- Proceso de transformación: Extrusión
- Sistema: Monofilamento plano y rizado.
- Resistencia a la tensión: > 400 MPa según método ASTM D-638.
- Temperatura de distorsión: 110 °C según método ASTM D-648.
- Temperatura de descomposición: 280 °C según método ASTM D-648.
- Elongación según el método ASTM D-638: 7%.
- Módulo de Elasticidad: > 6 GPa. según el método ASTM D-790.
- Fluidez: 1,8 a 3,2 gramos/minuto según método ASTM D-1238.
- Adherencia: Adherencia optima debido a los tratamientos químicos superficiales que mejoran el anclaje fibra/matriz cementante.
- Comportamiento químico: Estabilidad frente a cualquier ataque o proceso químico.

La dosificación utilizada ha sido la siguiente:

	13.05.13		22.05.13	
	AM1	AM2	AM1	AM2
Tipo de fibra	Plást. ENDURO 600	Plást. ENDURO 600	Plást. Sika Fiber M-48	Plást. Sika Fiber M-48
Kg/m3	5	4	4	5

Figura 4.11. Dosificación fibras plásticas

4.2.6.1.3 Fibras de vidrio

La fibra de vidrio utilizada ha sido la Anti-Crak HP (High Performance - Alto Rendimiento) 58/12 es una fibra de vidrio realizada con filamentos de vidrio AR (Álcali Resistente), concebida para reforzar morteros y hormigones contra fisuraciones.

Características:

- Longitud: 12 mm
- Relación de aspecto (longitud/diámetro): 58
- Densidad: 2,68 g/cm3
- Módulo de elasticidad: 72 Gpa
- Contenido de ensimaje: 0,8% (ISO 1887)
- Humedad: 0,3% máx. (ISO 3344)
- Material: Vidrio resistente a los álcalis
- Punto de ablandamiento: 860 °C
- Conductividad eléctrica: Muy baja
- Resistencia química: Muy alta
- Resistencia a la tracción: 1.700 MPa

Hay que añadir que dichas fibras presentan una longitud nominal, inferior a la de los otros tipos de fibras. De este modo, como veremos más adelante, los resultados obtenidos se verán afectados por esta circunstancia.



Figura 4.12 Fibra de vidrio Anti-Crak HP 58/12

En este caso, los kg/m³ de fibra en cada amasada han sido de 5 y 4 kg/m³.

4.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.3.1 Dosificación

Para conseguir la dosificación realizada, previamente se ha realizado un estudio granulométrico de los áridos.

Dicha dosificación, tanto para el hormigón de referencia como para el hormigón reforzado con fibras, se ha realizado aproximándose a la curva teórica de Bolomey.

El método de Bolomey es apto para áridos machacados, como en nuestro caso, y no para áridos rodados.

4.3.2 Condiciones ambientales

Saber el entorno donde va ubicado el hormigón es esencial. De modo que, podemos saber de antemano que clase de agentes ambientales perjudiciales van a poner en riesgo nuestro hormigón.

La EHE 08, en su artículo 8, nos define que es un ambiente, hace una clasificación de los diferentes lugares donde puede ir colocado según los tipos de agentes físicos y químicos que degradan nuestro hormigón como consecuencia de efectos diferentes a los de las cargas o sollicitaciones inicialmente previstos.

El tipo de ambiente viene dado por una clase general de exposición, que se especifica en la siguiente figura. Para nuestro caso particular, el ambiente en el que nos encontramos es IIIa:

CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN				DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso		
Marina	Aérea	IIIa	Corrosión por cloruros	Elementos de estructuras marinas, por encima del nivel de pleamar. Elementos exteriores de estructuras situadas en las proximidades de la línea costera a menos de 5 km.	Elementos estructurales de edificios en las proximidades de la costa, puentes en las proximidades de la costa, zona aérea de diques, pantanales y obras de defensa del litoral, e instalaciones portuarias.

Figura 4.13 Clase general de exposición (EHE-08 Tabla 8.2.2)

Nuestro hormigón se ha fabricado en la Universidad Politécnica de Valencia, a 2 km en línea recta del mar Mediterráneo, en ambiente marino y aéreo.

La EHE-08 nos obliga en función del ambiente donde nos encontremos a cumplir una máxima relación A/C para obtener una mínima resistencia y compacidad que proteja al hormigón de los elementos físicos y químicos exteriores.

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	CLASE DE EXPOSICIÓN												
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
Máxima Relación a/c	masa	0,65	-	-	-	-	-	-	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	armado	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	pretensado	0,60	0,60	0,55	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,45	0,45	0,55	0,50	0,50
Mínimo contenido de cemento (kg/m ³)	masa	200	-	-	-	-	-	-	275	300	325	275	300	275
	armado	250	275	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300
	pretensado	275	300	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300

Figura 4.14 Máxima relación A/C y mínimo contenido de cemento (EHE-08 Tabla 37.3.2.a)

Como nuestro ambiente es IIIa, al ser hormigón en masa no tenemos limitación de relación A/C ni de mínimo contenido de cemento (kg/m³).

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	CLASE DE EXPOSICIÓN												
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
resistencia Mínima (N/mm ²)	masa	20	-	-	-	-	-	-	30	30	35	30	30	30
	armado	25	25	30	30	30	35	30	30	30	35	30	30	30
	pretensado	25	25	30	30	35	35	35	30	35	35	30	30	30

Figura 4.15 Resistencias mínimas recomendadas en función de los requisitos de durabilidad (EHE-08 Tabla 37.3.2.b)

Como observamos en la figura superior, para un ambiente IIIa al ser hormigón en masa, no hay límite de resistencia mínima a compresión.

4.3.3 Hormigón de referencia

El primer paso a realizar para llevar a cabo nuestro análisis comparativo, ha sido el diseño de un hormigón de referencia en base a la norma UNE EN 14845-1.

El hormigón de referencia tiene como finalidad determinar la aptitud general de una fibra para su uso en hormigón.

Dicho hormigón debe cumplir unos parámetros específicos, que se definen a continuación:

- Tamaño máximo de áridos de 10 mm.
- Cemento Portland tipo CEM I 42,5R.
- Relación agua/cemento: 0,55.
- Posibilidad de adición de aditivo plastificante o superplastificante para controlar su trabajabilidad.

Otro de los parámetros importantes, es la consistencia que se pretende conseguir. Ésta debe ser fluida o líquida, ya que al añadir las fibras es necesaria una buena trabajabilidad, que se consigue con un asiento en el cono de Abrams del orden de 12-15 cm.

Resistencia a la tracción por flexión	Relación agua/cemento		Contenido máximo de cemento
(MPa)	Tamaño máximo del árido		(kg/m³)
	8 mm o 10 mm	16 mm o 20 mm	
4.3 ± 0.3 (25/30) ^c	0.55 ^b	0.55 ^a	350
5.8 ± 0.4 (40/50) ^c	0.45 ^b	0.45 ^b	400

^a Mezcla obligatoria.
^b Mezclas opcionales.
^c Clase de compresión equivalente según la Norma EN 1992-1-1.

Figura 4.16 Relación agua/cemento y contenidos límite de cemento (UNE EN 14845-1)

Además, el hormigón de referencia debe cumplir la resistencia a la tracción por flexión, según se especifica en la tabla superior, en función de la relación A/C utilizada y el contenido máximo de cemento.

En nuestro caso, con una relación A/C=0,55 y un contenido de cemento de 350 kg/m³, la resistencia obtenida es la siguiente:

$$f_L = \frac{3F_L l}{2bh_{sp}^2} = \frac{3 \times 14,5 \times 1000 \times 500}{2 \times 150 \times 125^2} = 4,64 \text{ N/mm}^2 = 4 \pm 0,3 \text{ N/mm}^2$$

dónde:

f_L es la resistencia a la tracción por flexión en la primera fisura, en Newtons por milímetro cuadrado.

l es la longitud de vano, en milímetros.

F_L , es la carga en primera fisura a la tracción por flexión, en Newtons.

b es la anchura de la probeta, en milímetros.

h_{sp} es la distancia entre el fondo de la entalla y la parte superior de la probeta, en milímetros.

Por tanto, concluimos que se cumple la resistencia a la tracción por flexión en el hormigón de referencia, ya que el valor obtenido, es un valor muy cercano al rango contemplado en la normativa.

Se realizaron dos amasadas para ajustar el hormigón de referencia.

La primera de ellas constaba de 2 probetas cilíndricas y 4 prismáticas, y la segunda y definitiva estaba formada por 3 probetas de cada tipo, ya que se comprobó que ésta última era mejor opción, puesto que

se necesitaban al menos resultados de 3 probetas de cada tipo, ya que se consideró que era la cantidad necesaria de probetas para garantizar la representatividad de los resultados.

La siguiente figura muestra la dosificación utilizada en nuestro hormigón de referencia:

DOSIFICACIÓN	kg/m ³
Relación A/C efectiva	0,55
Cemento (CEM I 42,5R)	350
Arena	192,5
Grava	828
Arena	990
Fibras	0
Aditivo plast. (Sika ViscoCrete 5720)	0,7% en peso del C
Filler	10
Densidad	2372,4

Figura 4.17 Dosificación hormigón de referencia

Como se puede observar en la dosificación, la densidad obtenida está dentro de las limitaciones, que suele oscilar entre los 2200 y los 2500 kg/m³.

En cada caso se hicieron correcciones por humedad y absorción, para finalmente obtener el agua a añadir.

Mientras que, la EHE-08 considera que la cantidad de agua que se empleará en la determinación de la relación A/C, será el agua total, entendiéndose como tal, “la formada por el agua directamente añadida a la amasada, el agua aportada por la humedad de los áridos (tanto de absorción como de agua superficial), el agua que pudiera quedar en la amasadora después del lavado de la misma y el agua que pudieran aportar los aditivos líquidos”. El resto de países de la Unión Europea y Estados Unidos se refieren siempre a relaciones de A/C “efectivas”.

De este modo, la norma europea EN 206 define el contenido efectivo de agua como “la diferencia entre el agua total presente en el hormigón fresco y el agua absorbida por los áridos”, es decir, descuenta el agua absorbida por éstos.

En definitiva, el agua a añadir en nuestras dosificaciones ha sido el agua efectiva, y no el agua total considerada en la EHE-08. Puesto que consideramos que son criterios que, al margen de la reglamentación española, resultan ser más razonables y reales, habida cuenta que el agua absorbida por los áridos se considera que no interviene en la hidratación de los componentes del cemento.

$$\text{Agua total} = \text{Agua a añadir} + \text{Agua en áridos}$$

$$\text{Agua efectiva} = \text{Agua total} - \text{Agua absorbida}$$

$$\text{Agua a añadir} = \text{Agua efectiva} + \text{Agua absorbida} - \text{Agua en áridos}$$

Para las correcciones por humedad de la arena y de los áridos, tomamos una muestra el día anterior a la realización de la amasada de Peso inicial 1 kg de arena y áridos en una bandeja que después meteremos 24 horas en un horno para secar completamente los áridos. Al día siguiente volvemos a pesar la arena seca y los áridos o Peso Seco.

La fórmula de la humedad (W) en porcentaje es la siguiente:

$$W(\%) = \frac{\text{Contenido de agua}}{\text{Peso seco}} \times 100 = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} \times 100$$

El porcentaje que nos dé, sacamos la cantidad de agua que debemos restar al agua a añadir, para así obtener el agua necesaria para no pasarnos de la relación A/C = 0,55 con ese grado de humedad en los áridos.

4.3.4 Modificación del HRF para añadir fibras

Una vez ajustado el hormigón de referencia, tal y cómo se ha descrito anteriormente, se modificó el mismo con la adición de fibras en proporciones variables.

De modo general, en cada amasada realizada se fabricaron 3 probetas cilíndricas y 3 probetas prismáticas, con el mismo tipo de fibras en cada una de ellas.

El programa experimental y el programa de amasadas se resumen en la siguiente figura:

Fecha amasada		Referencia	Nº probetas cilín./prismáticas	Tipo de fibra	kg/m3	Cono de Abrams (en cm)	Relación A/C
15.03.13		Sin fibras	2C/4P	--	--	5 Plástico	0,55
03.04.13		Sin fibras	3C/3P	--	--	12 Fluido	0,55
12.04.13	AM1	65/35	3C/3P	Metálica 65/35	20	20 Líquido	0,55
	AM2	65/35	3C/3P	Metálica 65/35	15	21 Líquido	0,55
19.04.13	AM1	80/35	3C/3P	Metálica 80/35	20	14 Fluido	0,55
	AM2	80/35	3C/3P	Metálica 80/35	25	20 Líquido	0,55
13.05.13	AM1	Pl. 600	3C/3P	Plást. ENDURO 600	5	8 Blando	0,55
	AM2	Pl. 600	3C/3P	Plást. ENDURO 600	4	18 Líquido	0,55
22.05.13	AM1	M-48	3C/3P	Plást. Sika Fiber M-48	4	17 Líquido	0,55
	AM2	M-48	3C/3P	Plást. Sika Fiber M-48	5	18 Líquido	0,55
24.05.13	AM1	F. vidrio	3C/3P	Fib. de vidrio	5	9 Blando	0,55
	AM2	F. vidrio	3C/3P	Fib. de vidrio	4	9 Blando	0,55

Figura 4.18 Planificación de la fabricación de las probetas

DOSIFICACIÓN	kg/m3
Relación A/C efectiva	0,55
Cemento (CEM I 42,5R)	350
Arena	192,5
Grava	826
Arena	985
Fibras	En función del tipo de fibra
Aditivo plast	0,7% en peso de C
Filler	10
Densidad	En función del tipo de fibra

Figura 4.19 Dosificación hormigón con fibras

La dosificación empleada en el hormigón con fibras, fue muy similar a la del hormigón de referencia, con ligeras modificaciones debido al ajuste correspondiente al volumen de fibras.

La densidad de dicho hormigón, al igual que en el hormigón de referencia, estaba dentro de los límites establecidos, con ligeras variaciones en función del tipo de fibra empleada en cada caso.

4.4 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para realizar los ensayos se fabricaron 34 probetas prismáticas, de las cuales 4 de ellas eran sin fibras, ya que se trataba del hormigón de referencia. Este tipo de probetas, son las que se utilizaron para realizar los ensayos de flexotracción conformes a la Norma Europea EN 12390-1, con un tamaño nominal (altura y anchura) de 150 mm y una longitud de 500 mm.

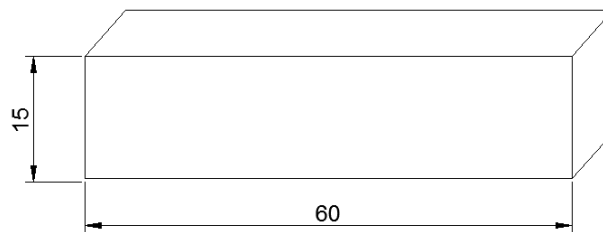


Figura 4.20. Dimensiones probeta prismática (Datos en cm)

También, se fabricaron 33 probetas cilíndricas, de las cuales 3 eran sin fibras, para la realización de los ensayos de compresión. Dichas probetas tenían un diámetro de 15 cm y una altura de 30 cm.

4.4.1 Fabricación de probetas cilíndricas y prismáticas

En primer lugar, se procedió a la preparación del hormigón de referencia, en base a la norma UNE EN 14845-1, el procedimiento a seguir fue el siguiente:

- Se prepara un lote de hormigón cuyo volumen debe estar comprendido entre el 50% y el 90% de la capacidad de la mezcladora.
- Se vierten todos los áridos secos en el depósito de la mezcladora, desde el más grueso al más fino y se mezcla durante un minuto aproximadamente.
- Se añade el filler y el cemento y se lleva a cabo la mezcla.
- Se añade el agua durante un minuto y se deja mezclar durante un minuto, para posteriormente añadir el aditivo y dejar amasar durante siete minutos.

Una vez preparado el hormigón, se procede a su vertido en las probetas, que han de estar previamente impregnadas de desencofrante. El molde debe rellenarse hasta el 90% de la altura de la probeta antes de la compactación, y debe completarse y enrasarse mientras se compacta.

El relleno del molde se realiza empezando por el centro y rellenando los bordes, en el caso de probetas prismáticas, según la figura adjunta.

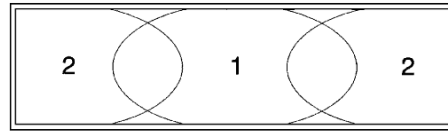


Figura 4.21 Método de relleno del molde. 1 y 2 orden de relleno

El método de vibrado por el que se ha optado, ha sido el picado con barra, para ello se han rellenado las probetas en tres tandas, picando cada una de las tandas 25 veces.



Figura 4.22 Determinación de la consistencia



Figura 4.23 Acabado probetas

La consistencia se ha evaluado por el método del Cono de Abrams (UNE 83-313-90; UNE 83-300; UNE EN 12350-2:2006; ASTM C143/C143M-09).

El ensayo se lleva a cabo en un molde en forma de tronco de cilindro, fabricado con chapa de acero galvanizado de base mayor 200 mm, base menor 100 mm y altura 300 mm, humedecido y colocado sobre una chapa metálica plana, rígida y no absorbente.

Se sujeta fuertemente el molde sobre la chapa con los pies y se procede a llenarlo con tres capas, de forma que cada una de ellas sea un tercio del volumen del molde. Con ayuda de una barra metálica de punta semiesférica de 16 mm de diámetro, se procede al compactado de cada una de las capas aplicando 25 pinchazos distribuidos uniformemente en superficie de la capa de modo que penetren hasta la capa inferior. Una vez compactada la última capa, se retira el hormigón sobrante y se enrasa con la línea de la base superior.

Acto seguido, con cuidado, se levanta el molde en dirección vertical lo más rápido posible. Finalmente, se coloca el molde al lado de la muestra de hormigón y se procede a medir la diferencia entre la altura de la pieza y el punto más alto del hormigón.

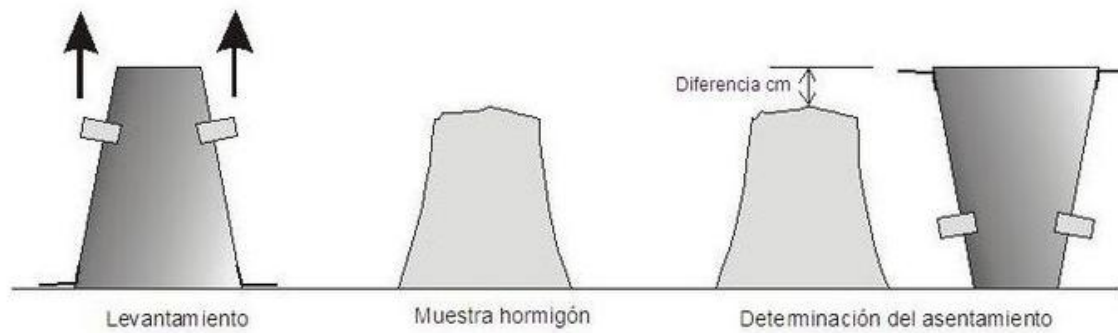


Figura 4.24 Determinación Cono de Abrams

Una vez realizado el hormigón de referencia, se pasó a la preparación de las amasadas de hormigón con fibras, la metodología a seguir para su fabricación fue la siguiente:

- Se prepara un lote de hormigón cuyo volumen debe estar comprendido entre el 50% y el 90% de la capacidad de la mezcladora.
- Se vierten todos los áridos secos en el depósito de la mezcladora, desde el más grueso al más fino y se mezcla durante un minuto aproximadamente.
- Se añade el filler y el cemento y se lleva a cabo la mezcla.
- Se añade el agua y se mezcla durante un minuto, para posteriormente añadir el aditivo y dejar amasar durante siete minutos, hasta que el aditivo reaccione.
- Finalmente, se añaden las fibras de manera homogénea, diferencia esencial con el hormigón de referencia, evitando que se produzcan acumulaciones de las mismas en el interior de la amasadora.



Figura 4.25 Preparación probetas de HRF



Figura 4.26 Compactación con mesa vibratoria

Una vez finalizada la preparación del hormigón, se procede al vertido del mismo en las probetas y a su compactación, mediante picado con barra si el hormigón obtenido es de consistencia fluida o líquida, o mediante mesa vibratoria, en caso de obtener hormigones con consistencias blandas o secas.

Dichas consistencias se especifican en la siguiente figura:

Tipo de consistencia	Asentamiento en cm
Seca (S)	0-2
Plástica (P)	3-5
Blanda (B)	6-9
Fluida (F)	10-15
Líquida (L)	16-20

Figura 4.27 Cuadro de consistencias (Artículo 31.5 EHE-08)

4.4.2 Curado de las probetas

El curado es un proceso importante para alcanzar la resistencia deseada. El desarrollo de resistencia y su durabilidad se produce gracias a la reacción química del agua con el cemento. Por tanto, será necesario proteger al hormigón para que adquiera la resistencia requerida en condiciones de temperatura y humedad constante.

Existen varios métodos: mojar la estructura permanentemente, cubrir las estructuras con telas de plástico, cubrir con pinturas impermeables la superficie del hormigón o las cámaras de humedad. El método a utilizar en nuestro caso, ha sido el de la cámara de humedad.

La EHE-08 en su artículo 74 hace referencia a parámetros y velocidades de curación.

En el curado tratamos de mantener el hormigón saturado de agua al 100% o un porcentaje próximo para evitar la pérdida de humedad en su superficie por evaporación. Otro factor influyente es la temperatura. Es recomendable mantener 20°C de manera constante para mantener la hidratación y nunca bajar de ninguna manera de los 10°C.

La hidratación del cemento desarrolla a los 7 días el 80 % de la resistencia especificada a los 28 días. Se cumplirá si el curado es adecuado, en caso contrario ralentizaremos la reacción química del agua con el cemento y dejaremos de ganar resistencia. Si por alguna razón el curado se detiene y luego se reanuda, difícilmente obtendremos una recuperación de la resistencia como se tendría con el curado permanente y continuo.

Es por esta razón por la cual los ensayos de flexotracción y compresión de las probetas se realizan a los 28 días. En la siguiente gráfica se muestra el desarrollo del proceso de curado.

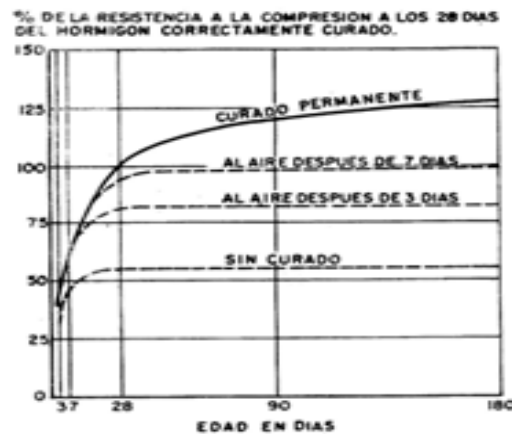


Figura 4.28 Evolución resistencia con el curado

En nuestro caso, las probetas se han mantenido un tiempo mínimo de 28 días en cámara de humedad a 20°C y 90 % de humedad. Dicha cámara está ubicada en el Laboratorio de la Escuela de Caminos de la Universidad Politécnica de Valencia.

4.4.3 Programa de ensayos

4.4.3.1 Descripción método de ensayos

Los ensayos se realizaron todos a 28 días, puesto que es el tiempo necesario para que el hormigón alcance prácticamente toda su resistencia.

En cada amasada, se fabricaron 3 probetas cilíndricas y 3 probetas prismáticas, para ensayo a 28 días. Las cilíndricas eran para rotura a compresión y las prismáticas para rotura a flexotracción.

4.4.3.1.1 Ensayo a compresión

El fundamento del ensayo a compresión consiste en la rotura de las probetas cilíndricas en una prensa de ensayo de compresión. Usando dicha prensa se registra la máxima carga alcanzada por la probeta y se calcula la resistencia a compresión del hormigón.

Las probetas ensayadas tienen un diámetro de 15 cm y una altura de 30 cm.

El procedimiento para su ensayo se ha hecho siguiendo las directrices de la UNE EN 12390. En primer lugar, se realiza la preparación y el posicionamiento de las probetas, previamente refrentadas con azufre para conseguir una superficie de apoyo plana. Los pasos a seguir en esta fase han sido los siguientes:

- Se limpian los platos de carga de la máquina, debiendo eliminarse cualquier resto de gravilla u otro material extraño de las superficies de la probeta que han de estar en contacto con los platos.
- Se seca el exceso de humedad de la superficie de la probeta antes de ponerla en la máquina de ensayos.
- Las probetas deben centrarse respecto al plato inferior con una aproximación de $\pm 1\%$ de la dimensión normalizada del lado de la probeta cúbica o del diámetro normalizado de la probeta cilíndrica.



Figura 4.29 Refrentado de las probetas

Para la carga, se ha procedido de la siguiente manera:

- Se selecciona una velocidad de carga constante dentro del rango de $0,6 \pm 0,2$ MPa/s ($\text{N/mm}^2 \cdot \text{s}$). Se aplica la carga inicial, que no debe exceder de aproximadamente el 30% de la carga de rotura. Después de esto, se aplica la carga a la probeta sin brusquedades y se incrementa continuamente, a la velocidad seleccionada $\pm 10\%$, hasta que no se pueda soportar más carga.
- Se registra la carga máxima indicada en kN.



Figura 4.30 Rotura probeta a compresión



Figura 4.31 Prensa para realizar los ensayos a compresión

4.4.3.1.2 Ensayo a flexotracción

El ensayo a flexotracción realizado está basado en el procedimiento indicado en la Norma UNE EN 14651.

En primer lugar, se procede a la realización de la entalla en las probetas para proceder a su ensayo. La profundidad de la entalla fue de 25 mm.



Figura 4.32 Probeta con entalla

Para realizar la entalla, debe utilizarse un método de aserrado por vía húmeda para entallar las probetas. Éstas deben ser giradas 90° alrededor de su eje longitudinal y a continuación serrarse en su anchura en la sección de centro de vano.

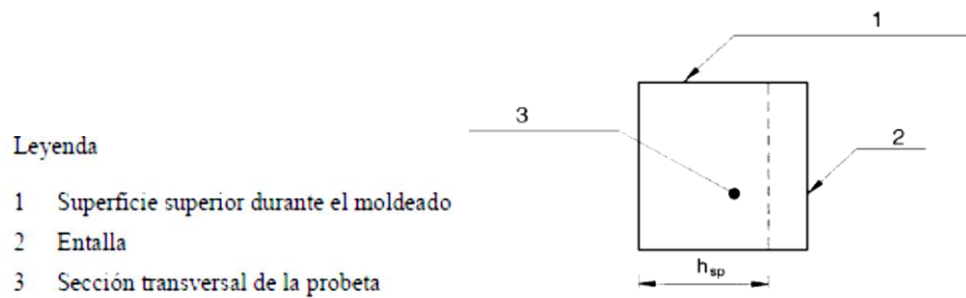


Figura 4.33 Posición de la entalla serrada en la probeta antes de la rotación.

Una vez, serradas las probetas se procede a su preparación y colocación para realizar el ensayo.

Según la Norma, todos los rodillos deben ser de acero y deben tener una sección transversal circular de $30 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de diámetro. Su longitud debe ser, al menos, 10 mm mayor que la anchura de la probeta. Su superficie debe ser lisa y estar limpia.

Dos rodillos, incluyendo el rodillo superior, deben poder girar libremente alrededor de su eje y ser abatibles en un plano perpendicular al eje longitudinal de la probeta.

La distancia entre los centros de dos rodillos de apoyo (es decir, la longitud de vano) debe ser igual a 500 mm. Todos los rodillos deben ajustarse en su posición correcta, teniendo todas las distancias una precisión de $\pm 2,0 \text{ mm}$.

La anchura media de la probeta y la distancia entre el fondo de la entalla y la parte superior de la probeta en la sección de centro de vano deben determinarse a partir de dos mediciones efectuadas con ayuda de un calibre, con una precisión de 0,1 mm, de la anchura y de la distancia en la parte entallada de la probeta.

Cuando se mide el desplazamiento del borde de la fisura (o de la entalla), se debe instalar un transductor de desplazamiento a lo largo del eje longitudinal, en la mitad de la anchura de la probeta, de modo que la distancia entre la parte inferior de la probeta y la línea de medición sea inferior o igual a 5 mm.

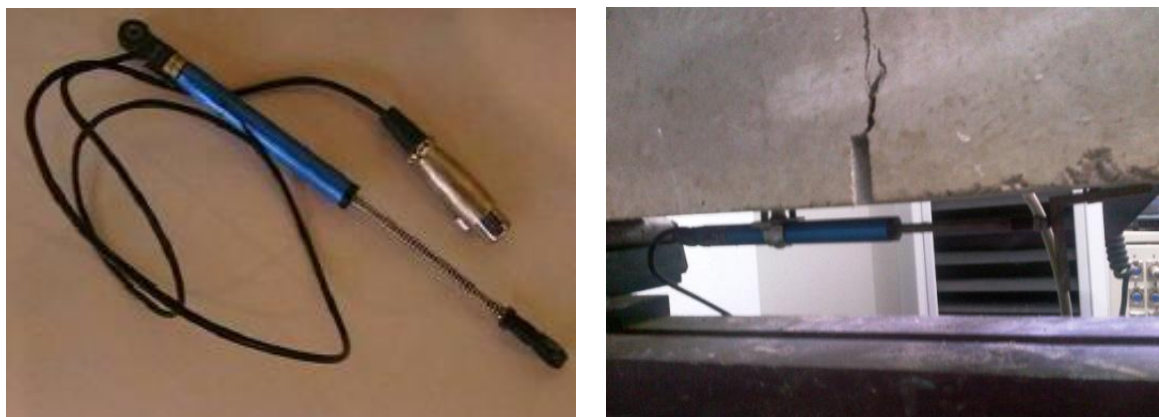


Figura 4.34 Captador de desplazamiento y colocación en la probeta

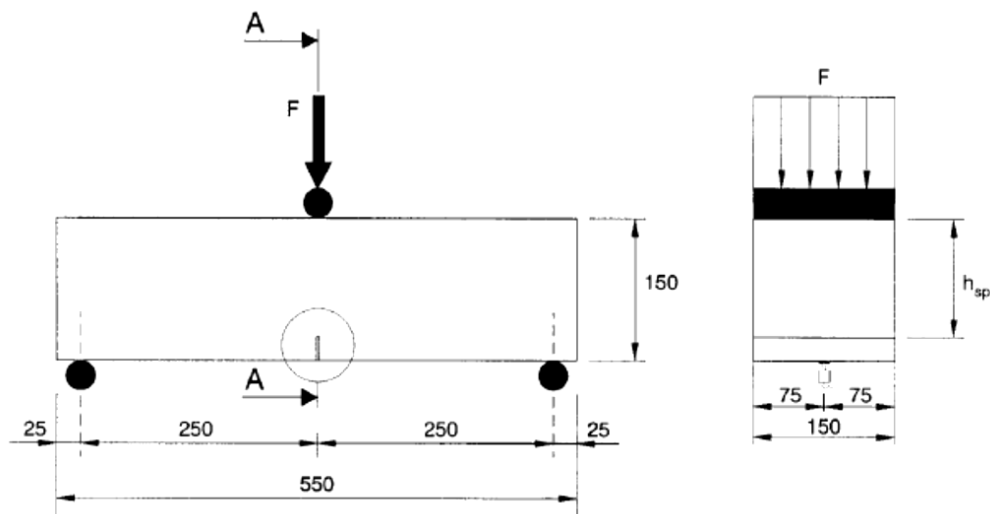


Figura 4.35. Esquema general de la probeta en el ensayo

Una vez posicionadas la probetas en la prensa, se procede a su alineación y centrado con respecto a los rodillos y a la máquina, y se conecta el captador de desplazamiento al ordenador, que se encarga de registrar las mediciones.

Antes de iniciar el ensayo, se somete la probeta a una precarga de aproximadamente 30 kg y se ajusta la velocidad a 0,05 mm/min.

Cuando con dicha velocidad se ha llegado a un desplazamiento de 0,5 mm, es decir a la prefisura, se detiene el ensayo para cambiar de nuevo la velocidad. En este caso, dicha velocidad pasa de ser de 0,05 a 0,2mm/min, hasta llegar a una abertura de fisura de 4mm, deteniendo el ensayo una vez alcanzado dicho valor.

La duración media del ensayo suele estar en torno a los 45 minutos.



Figura 4.36 Registro de datos en el ordenador portátil

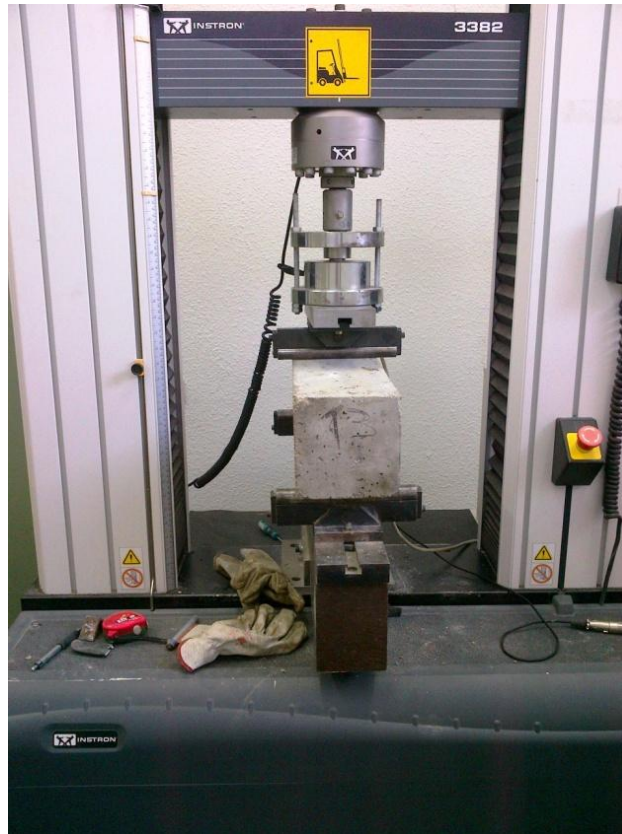


Figura 4.37 Disposición de la probeta en la prensa

5 RESULTADOS TRAS EL ENSAYO EN EL LABORATORIO DE LAS PROBETAS

5.1 RECUENTO DE FIBRAS TRAS SU ROTURA

Después de la realización de los ensayos, tal y como se explica en la Metodología (Punto 4), se obtuvieron los resultados que a continuación se analizan, en función del tipo de fibras empleadas y de su dosificación.

Excepto en el caso del hormigón de referencia, una vez ensayadas se procedió a su rotura para realizar un cálculo de las fibras contenidas en dichas caras.

El método consistió en dividir las caras resultantes en la zona de rotura en cuatro partes iguales, tal y como muestran las siguientes figuras:

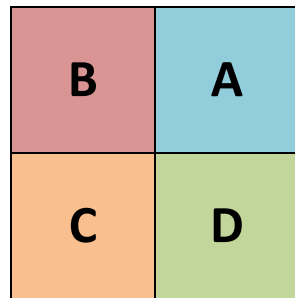


Figura 5.1 Contenido de fibras cara 1

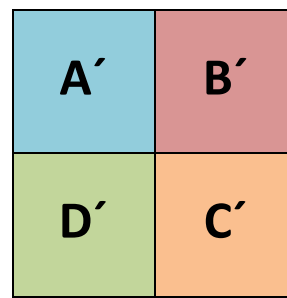


Figura 5.2 Contenido de fibras cara 2

En cada parte sólo comprobamos el número de fibras que sobresalen perpendiculares a la sección fisurada, las que realmente han trabajado a la hora de realizar el ensayo de flexotracción.

En el caso de que haya más fibras en la parte superior que en la inferior, el esfuerzo será menor para provocar la rotura, ya que en la parte inferior si no hay o existen pocas, no hacen el efecto de cosido.

Por el contrario, si están agrupadas en la parte de abajo, al estar ésta traccionada, las fibras harán efecto de cosido y necesitará de un mayor esfuerzo para que se abra la fisura, lo cual en ambos casos nos complementa visualmente información para comprender mejor el comportamiento en las gráficas obtenidas en el ensayo.

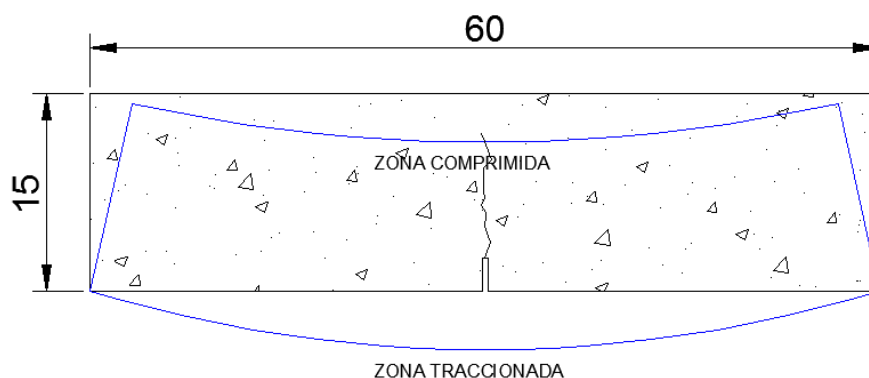


Figura 5.3 Forma de trabajo de la probeta

5.2 RESULTADOS A FLEXOTRACCIÓN

5.2.1 Resultados de probetas sin fibras

Probeta	Resultados a flexotracción (KN)
Prob. 1	11
Prob. 2	13,5
Prob. 3	17,5
Prob. 4	17,5

Figura 5.4 Tabla resultados a flexotracción del Hormigón de referencia

La tabla superior pertenece a los valores obtenidos durante el ensayo a flexotracción, realizado sin captador de desplazamiento, puesto que el hormigón de referencia no tiene resistencia residual tras su rotura, por no tener fibras. Por lo que no es necesario hacer uso del mismo.

De la tabla podemos deducir que las probetas han sido capaces de soportar una carga aproximada que oscila entre los 11 y 17,5 KN, hasta su rotura. Puesto que no lleva fibras, se trata de una rotura frágil y por tanto, el desplazamiento de la probeta es nulo.



Figura 5.5 Rotura probeta sin fibras durante su ensayo

5.2.2 Resultados de probetas con fibras metálicas

En el siguiente apartado se muestran gráficamente los resultados obtenidos tras la realización de los ensayos a flexotracción de probetas con fibras metálicas.

Las gráficas obtenidas nos muestran la relación entre la carga capaz de soportar el hormigón antes y después de su fisuración, y el desplazamiento o abertura de fisura que experimenta la probeta, tras su fisuración.

5.2.2.1 Fibras metálicas 65/35

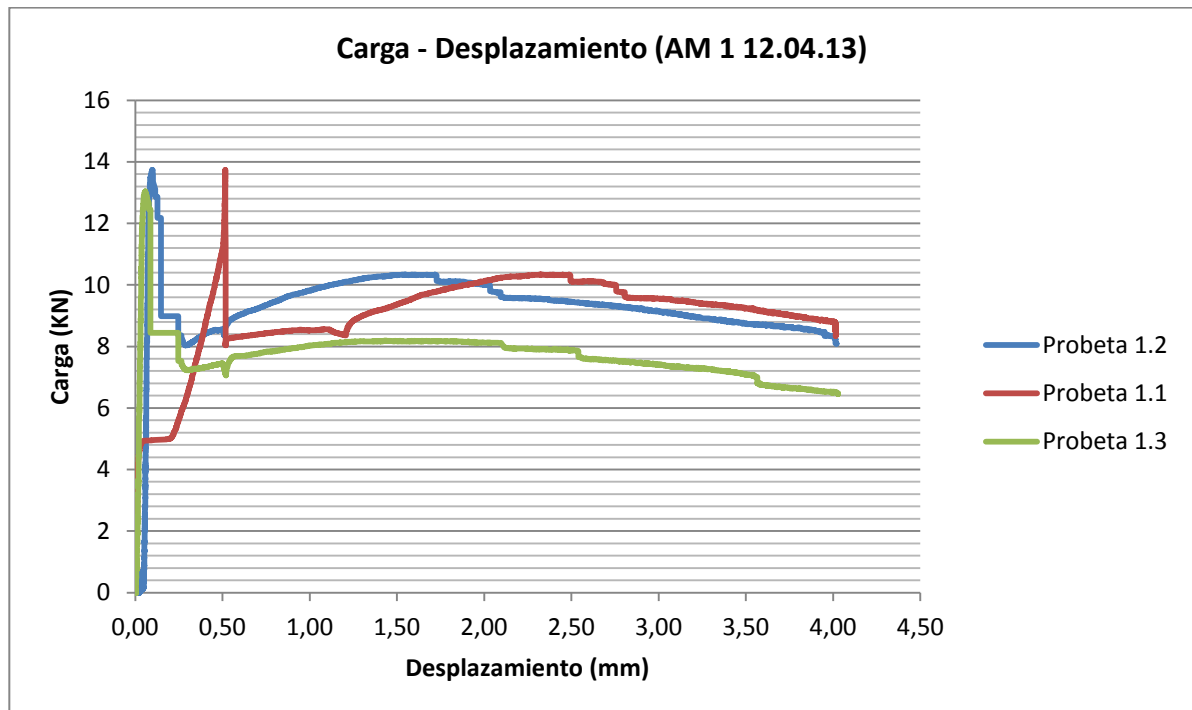


Figura 5.6 Gráfica Carga-Desplazamiento (dosif. Fibras 20 kg/m³)

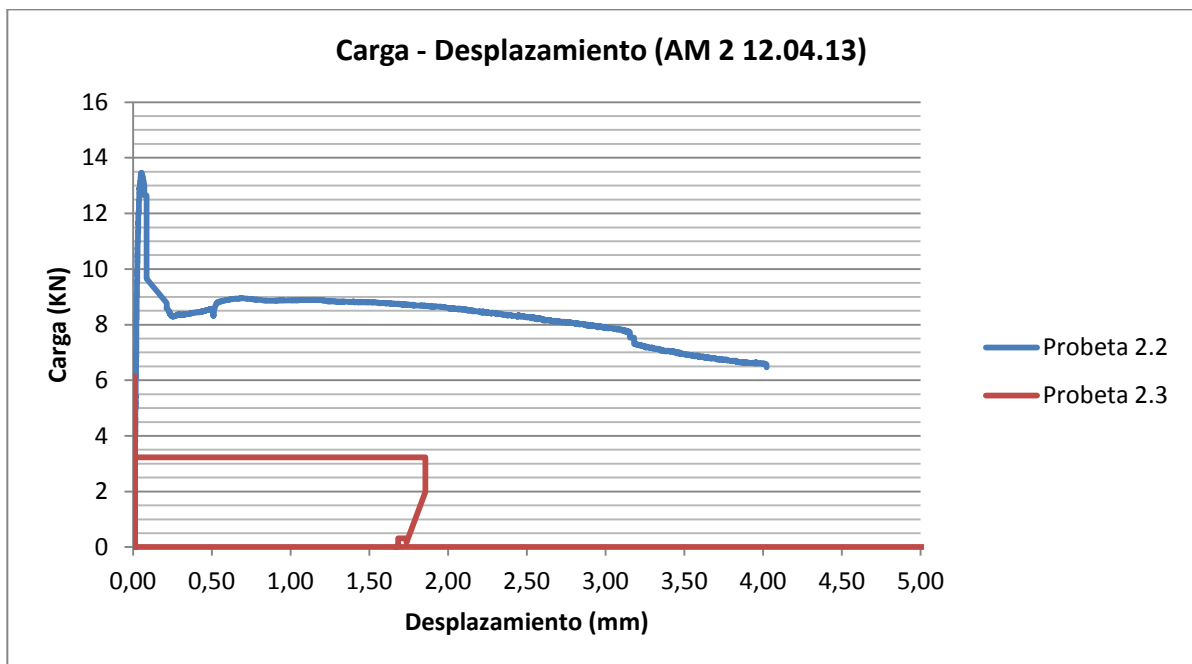


Figura 5.7 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 15 kg/m³)

Tras el análisis de las gráficas, se puede deducir que se ha obtenido una curva carga/desplazamiento que muestra tres tramos claramente diferenciados:

- Una primera fase ascendente muy lineal hasta un pico de carga máxima.
- Una rama descendente difícil de controlar en las condiciones de ensayo.
- Un tramo prácticamente horizontal con una resistencia residual casi constante.

Tal y como se observa en las gráficas, la carga máxima soportada por las probetas en las dos dosificaciones ha sido de unos 13,5 kN, resistencia alcanzada principalmente por la contribución del hormigón. Después de su rotura las fibras metálicas han sido capaces de conseguir una resistencia residual de unos 9-10 kN.

En la amasada 2 sólo se han obtenido resultados fiables, de una de las probetas, por lo que la comparación realizada con la amasada 1 no es completa. Pese a que la diferencia entre ellas es la dosificación de fibras, siendo de 20 kg/m³ en la amasada 1 y de 15 kg/m³ en la 2, la resistencia alcanzada por las probetas de distintas amasadas es prácticamente la misma, hasta la fisuración de las mismas.

AMASADA 1 DÍA 12-4-2013								
PROBETA	A	A'	B	B'	C	C'	D	D'
1	9	14	13	12	16	16	11	15
2	11	13	12	10	10	11	13	11
3	14	10	13	10	10	9	10	10
AMASADA 2 DÍA 12-4-2013								
PROBETA	A	A'	B	B'	C	C'	D	D'
1	7	6	13	10	8	9	4	3
2	11	9	11	11	9	11	8	12
3	14	3	5	9	8	4	6	8

Figura 5.8 Tabla contenido de fibras después de la rotura



Figura 5.9 Probetas rotas tras el ensayo

Tras el recuento de fibras, de la tabla superior se deduce que éstas han estado distribuidas uniformemente en la sección transversal de las probetas.

En la amasada 1 el número total de fibras en cada zona es similar. Mientras que en la amasada 2, existe una mayor variación, siendo la zona B y B' la que posee una mayor concentración, y la zona D y D' la que contiene un menor número de fibras.

De esto se deduce que en la amasada 2 el esfuerzo para obtener un efecto de cosido ha sido menor, ya que las fibras estaban concentradas generalmente en la zona comprimida y no en la traccionada.

Como caso particular, señalar que la probeta 3 perteneciente a la amasada 2, tiene generalmente un menor número de fibras, y además, la curva obtenida en la gráfica, no se aproxima a las demás, esto puede ser debido a un desplazamiento indebido del captador.

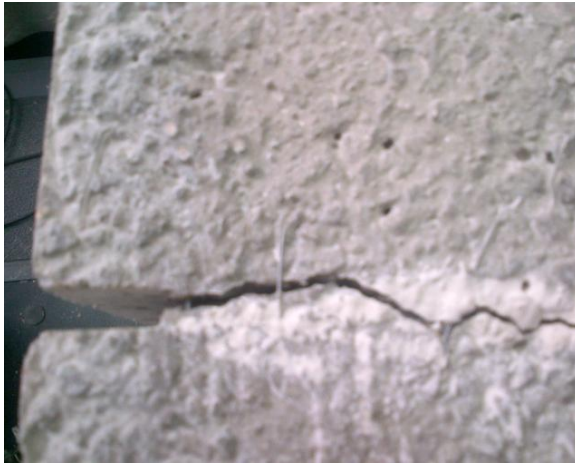


Figura 5.10 Efecto de cosido de las fibras metálicas



Figura 5.11 Fisuración probeta durante el ensayo

5.2.2.2 Fibras metálicas 80/35

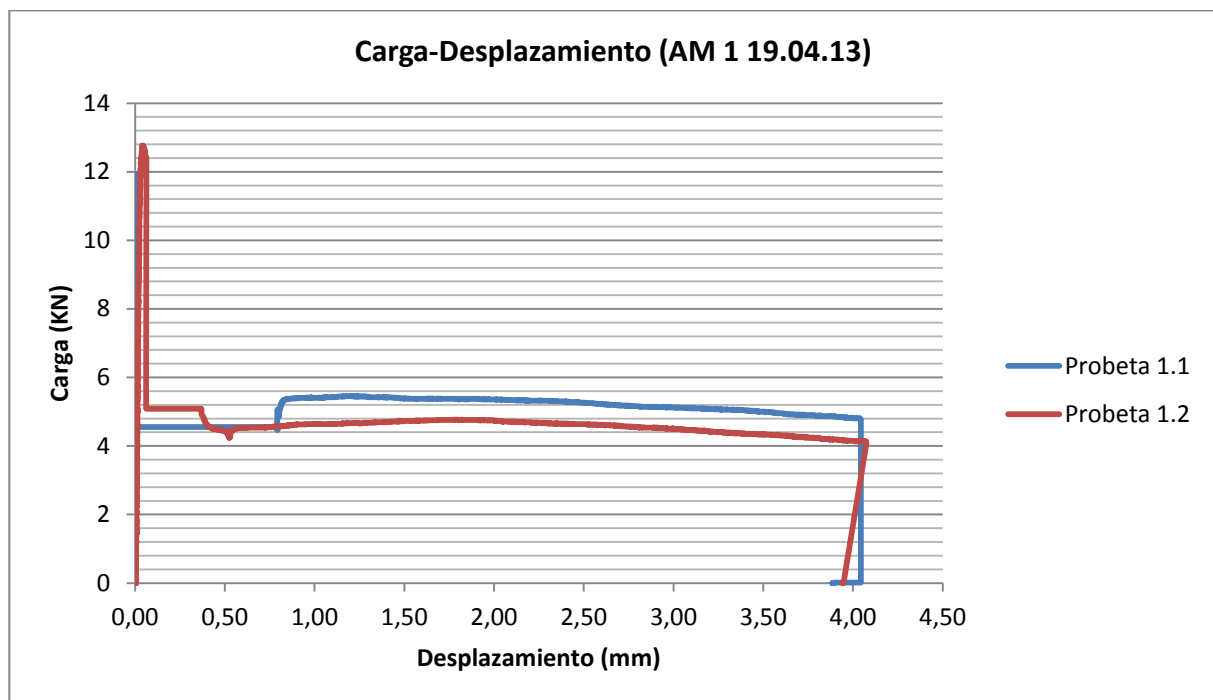


Figura 5.12 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 20 kg/m³)

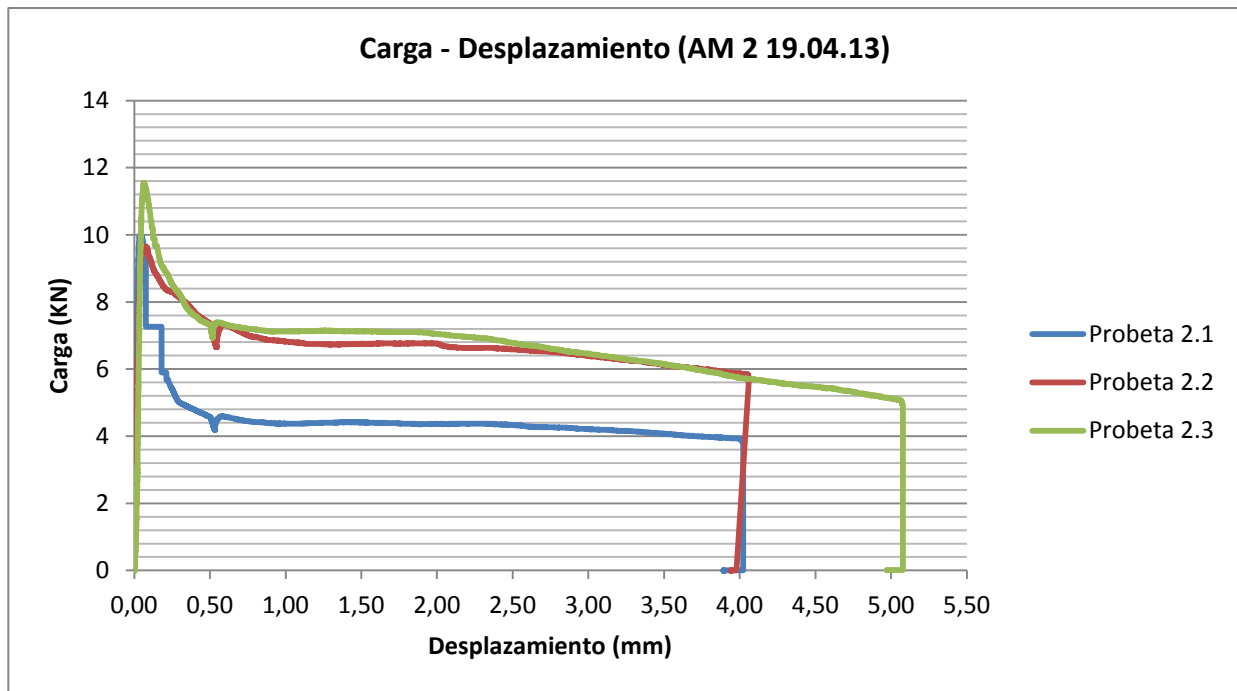


Figura 5.13 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 25 kg/m³)

En las dos gráficas superiores, se puede observar, que con una dosificación de 20 kg/m³ el pico de carga máxima ha sido alcanzado a los 12,5-13 kN. Mientras que, con una dosificación de 25 kg/m³ la carga máxima, no ha llegado a los 12 kN, esta diferencia también ocurre en las probetas rotas a compresión, como veremos en el siguiente apartado.

Esto muestra que el pico de carga máxima no depende de la dosificación de fibras sino de la resistencia de dicho hormigón, ya que éstas aún no están actuando. Esto nos demuestra que con una mayor cantidad de fibras, no es necesario alcanzar resistencias superiores que con menores dosificaciones.

AMASADA 1 DÍA 19-4-2013								
PROBETA	A	A'	B	B'	C	C'	D	D'
1	18	16	21	20	11	12	17	16
2	15	16	9	11	15	11	10	8
3	14	12	18	18	16	18	19	11
AMASADA 2 DÍA 19-4-2013								
PROBETA	A	A'	B	B'	C	C'	D	D'
1	21	11	12	14	12	11	18	12
2	19	19	19	23	16	18	17	17
3	14	18	21	16	16	16	14	19

Figura 5.14 Tabla contenido de fibras después de la rotura



Figura 5.15 Probetas rotas tras el ensayo

En este caso, la información complementaria aportada por el recuento de fibras tras su ensayo y posterior rotura, nos permite deducir que las fibras han estado repartidas proporcionalmente en cada una de las cuatro zonas, por lo que el esfuerzo a realizar ha sido similar tanto en la zona inferior como en la superior.

5.2.3 Resultados de probetas con fibras de plástico

5.2.3.1 Fibras de plástico ENDURO 600

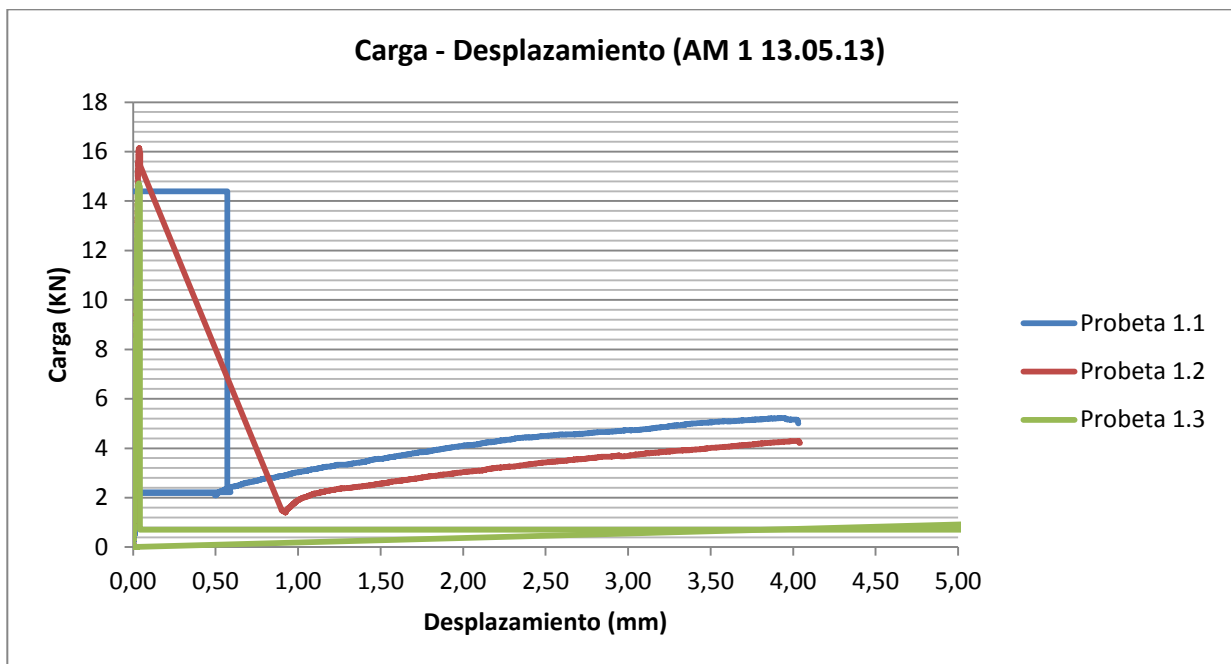


Figura 5.16 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 5 kg/m³)

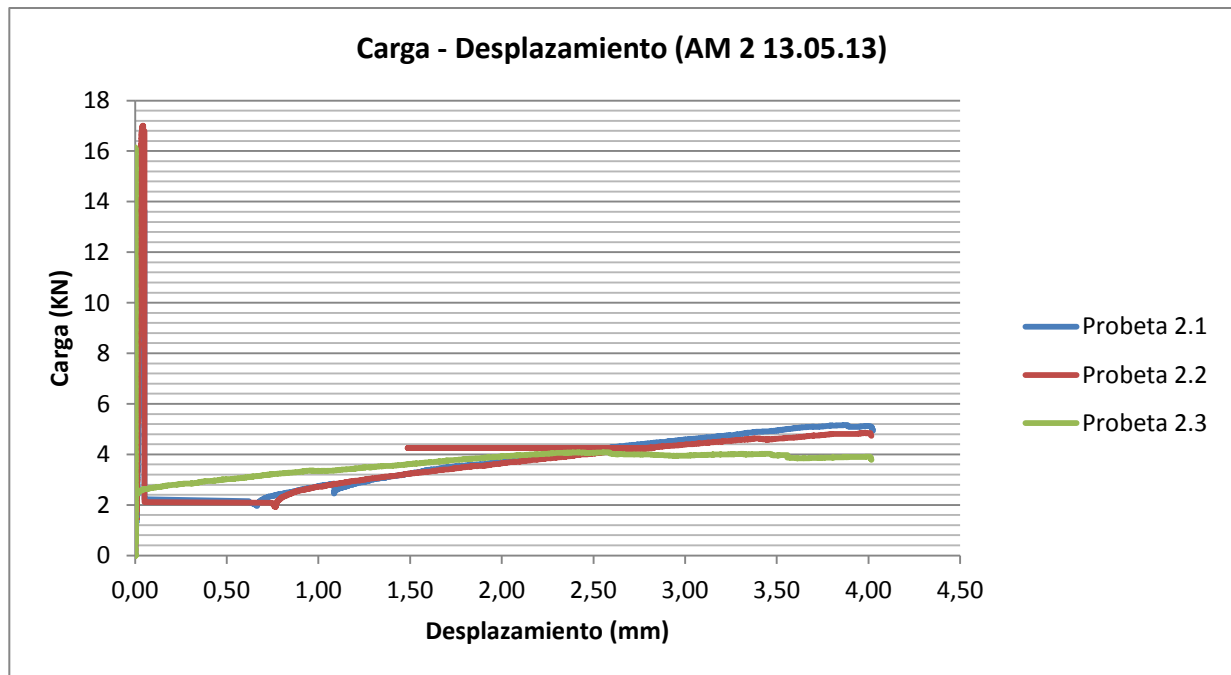


Figura 5.17 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 4 kg/m³)

Utilizando fibras plásticas, también se obtienen tres tramos claramente diferenciados, aunque con dichas fibras se alcanzan resistencias residuales generalmente menores que con fibras metálicas. Por tanto, la recuperación es menor.

Mientras que, con hormigones reforzados con fibras metálicas las resistencias residuales alcanzadas han sido de unos 9-10 kN, con fibras plásticas apenas se llega a los 6 kN.

En estas amasadas, se han alcanzado cargas máximas superiores que con fibras metálicas, del orden de los 16-17 kN.

Esto se debe a las resistencias a compresión obtenidas, cómo se puede ver más adelante, en cada una de las amasadas. Siendo ligeramente menor en las amasadas realizadas con fibras metálicas DRAMIX 80/35.

AMASADA 1 DÍA 13-5-2013								
PROBETA	A	A'	B	B'	C	C'	D	D'
1	14	13	12	20	13	8	13	13
2	11	11	15	11	14	16	6	11
3	6	5	8	18	9	10	8	9
AMASADA 2 DÍA 13-5-2013								
PROBETA	A	A'	B	B'	C	C'	D	D'
1	12	9	15	17	19	11	11	17
2	17	12	13	5	16	11	9	15
3	8	18	19	9	12	8	9	13

Figura 5.18 Tabla contenido de fibras después de la rotura



Figura 5.19 Probetas rotas tras el ensayo

En cuanto a la concentración de fibras, cabe destacar que la probeta 3 de la amasada 1, presenta una concentración ligeramente menor al resto de fibras pertenecientes a la misma amasada, esto podría explicar la gráfica obtenida, ya que la resistencia obtenida una vez el hormigón ha dejado de actuar es mucho menor que la obtenida en el resto de las probetas.

Del resto de probetas, añadir que la cantidad de fibras es similar en todas ellas.

5.2.3.2 Fibras de plástico Sika-Fiber M-48

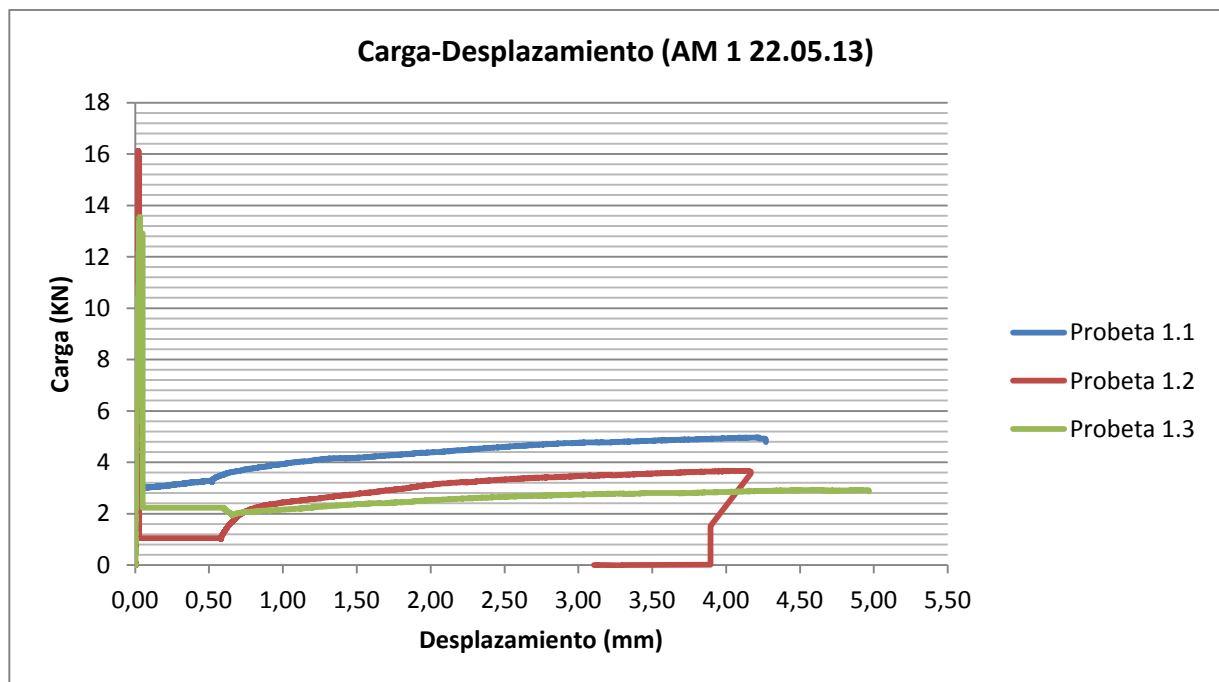


Figura 5.20 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 4 kg/m³)

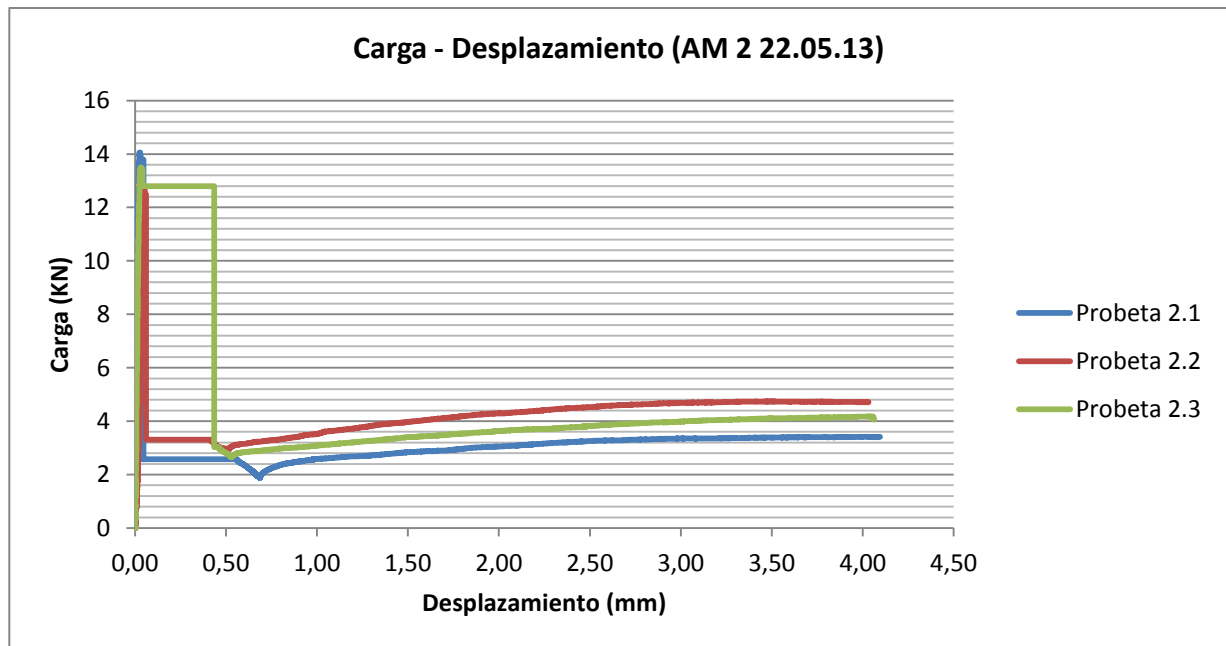


Figura 5.21 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 5 kg/m³)

Los resultados obtenidos, con este tipo de fibras, son similares a los anteriores. Se observa una primera fase, en la que actúan conjuntamente el hormigón y las fibras, hasta un pico de carga máxima de unos 14 kN.

La segunda fase, es menos lineal, con variaciones en cada una de las probetas hasta conseguir un tramo horizontal.

Este último tramo corresponde a la resistencia residual alcanzada por las fibras, ya que en esta etapa el hormigón deja de actuar, y la probeta resiste a través de las fibras. De este modo, la resistencia residual alcanzada ha sido de unos 4-5 kN.

Como particularidad, señalar que en la probeta 3 se aprecia un desplazamiento anómalo, posiblemente por un movimiento indebido del captador.

AMASADA 1 DÍA 22-5-2013								
PROBETA	A	A'	B	B'	C	C'	D	D'
1	12	11	31	19	15	13	14	7
2	11	17	14	24	11	9	10	8
3	11	12	8	8	10	10	10	7
AMASADA 2 DÍA 22-5-2013								
PROBETA	A	A'	B	B'	C	C'	D	D'
1	6	8	13	12	4	9	9	6
2	11	10	12	18	13	11	9	7
3	14	10	11	19	13	14	14	11

Figura 5.22 Tabla contenido de fibras después de la rotura



Figura 5.23 Probetas rotas tras el ensayo

Por otra parte, prestando especial atención a la tabla superior, cabe destacar que en la amasada 1 las fibras han tendido a concentrarse generalmente en las zonas B y B', pertenecientes a la cara superior de las probetas, por lo que el esfuerzo para provocar la rotura ha sido menor, puesto que las fibras estaban dispuestas en la zona comprimida.

Respecto a la amasada 2, hay que señalar que ocurre lo mismo que en la anterior, aunque la concentración de fibras es ligeramente menor.

5.2.4 Resultados de probetas con fibras de vidrio

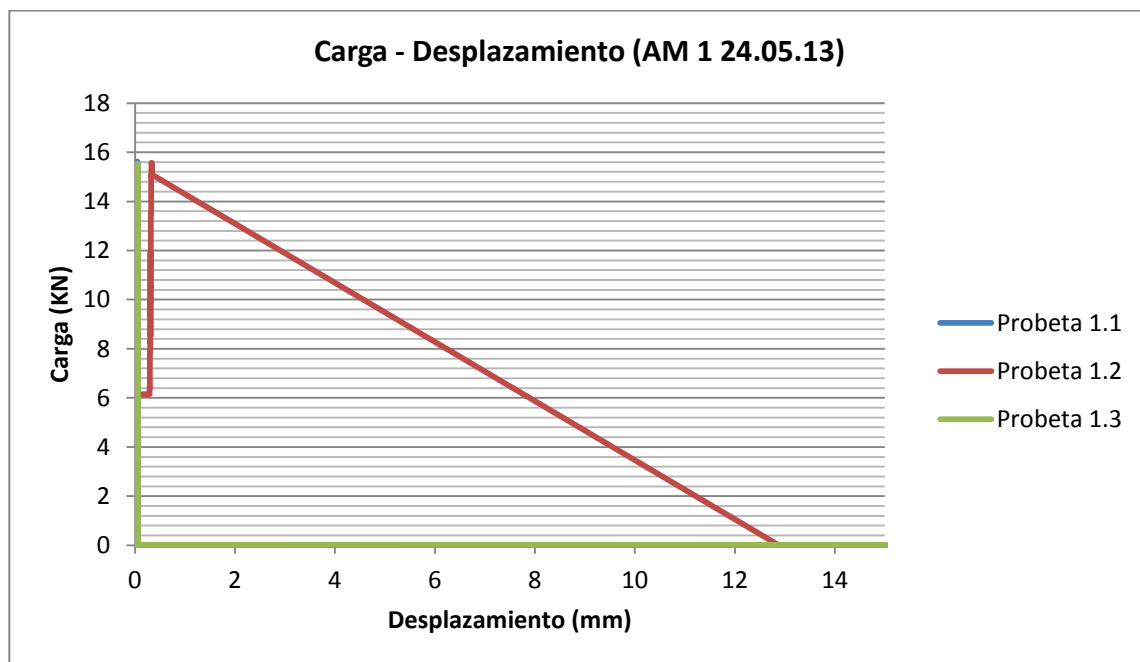


Figura 5.24 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 5 kg/m³)

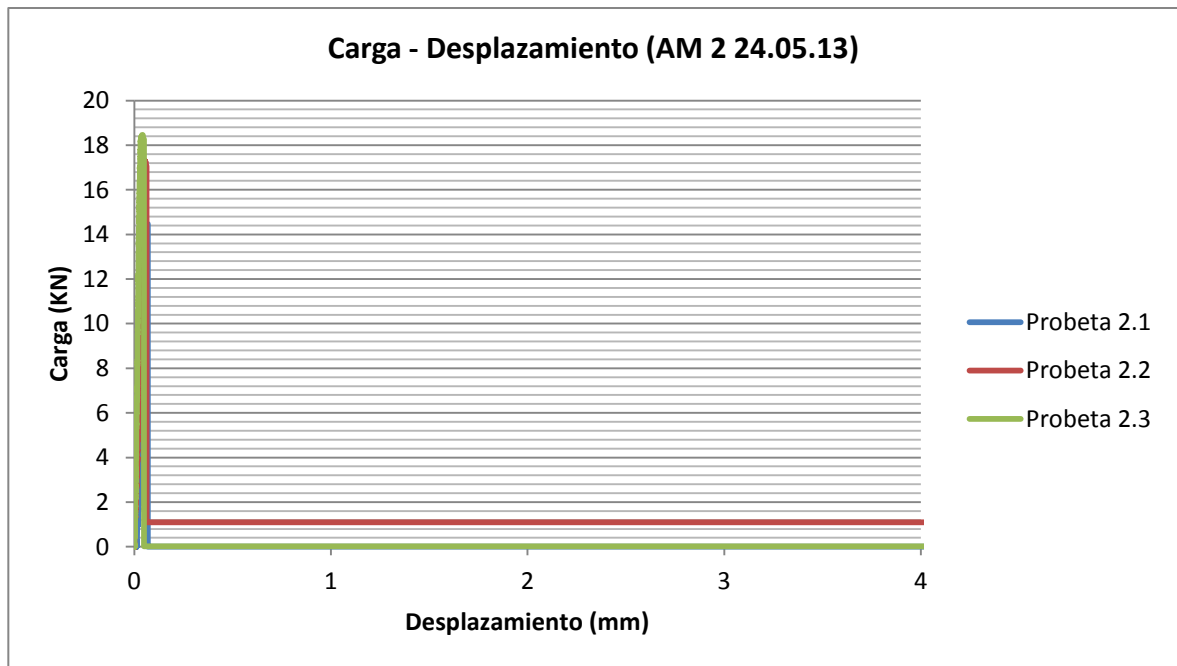


Figura 5.25 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 4 kg/m³)

Como hemos dicho anteriormente, las fibras de vidrio no son aptas para resistir estructuralmente, por lo que las gráficas obtenidas son muy similares a las obtenidas con hormigones sin fibras.

En este caso, la rotura de la probeta ha sido inmediata y las fibras no han sido capaces de coser la fisura.

En la primera amasada el hormigón ha sido capaz de alcanzar una carga máxima de unos 16 KN y en la segunda amasada se ha llegado a los 18 KN. La resistencia residual ha sido nula.



Figura 5.26 Imágenes de la fibra de vidrio obtenidas con el microscopio (longitud fibra 12 mm)

De las fibras de vidrio no se han podido obtener resultados del recuento tras su rotura, ya que sus diminutas dimensiones no lo permitían.

El recuento de las mismas, se hubiera podido realizar con métodos alternativos, como la impregnación de las fibras mediante spray, previa introducción en el amasado o con pintura de un color diferente al hormigón, que nos permitiese distinguir las fibras.

5.3 RESULTADOS A COMPRESIÓN

Como hemos señalado anteriormente, nos remitimos de nuevo a la norma UNE 12390 en la que nos dice que la incorporación de fibras no afecta de manera significativa a la resistencia a compresión del hormigón puesto que son los áridos los que le soportan las cargas a compresión que se producen en el hormigón.

La determinación de la resistencia a compresión se efectuará según dicha norma.

En el caso de probetas cilíndricas, sólo será necesario refrentar aquellas caras cuyas irregularidades superficiales sean superiores a 0,1 mm o que presenten desviaciones respecto al eje de la probeta que sean mayores de 0,5°, por lo que, generalmente será suficiente refrentar sólo la cara de acabado.



Figura 5.27 Ensayo a compresión de probeta cilíndrica

A continuación, se representan los valores de compresión obtenidos, con distintas fibras, cada color representa una amasada diferente:

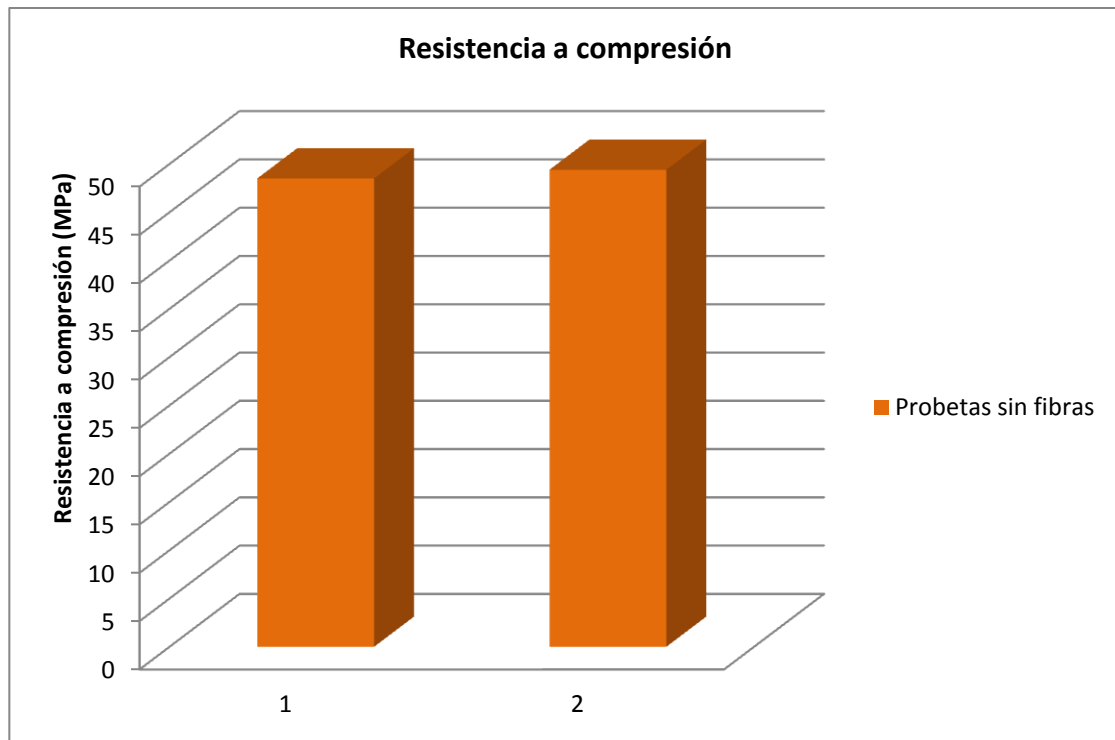


Figura 5.28 Resistencia a compresión (Hormigón de referencia)

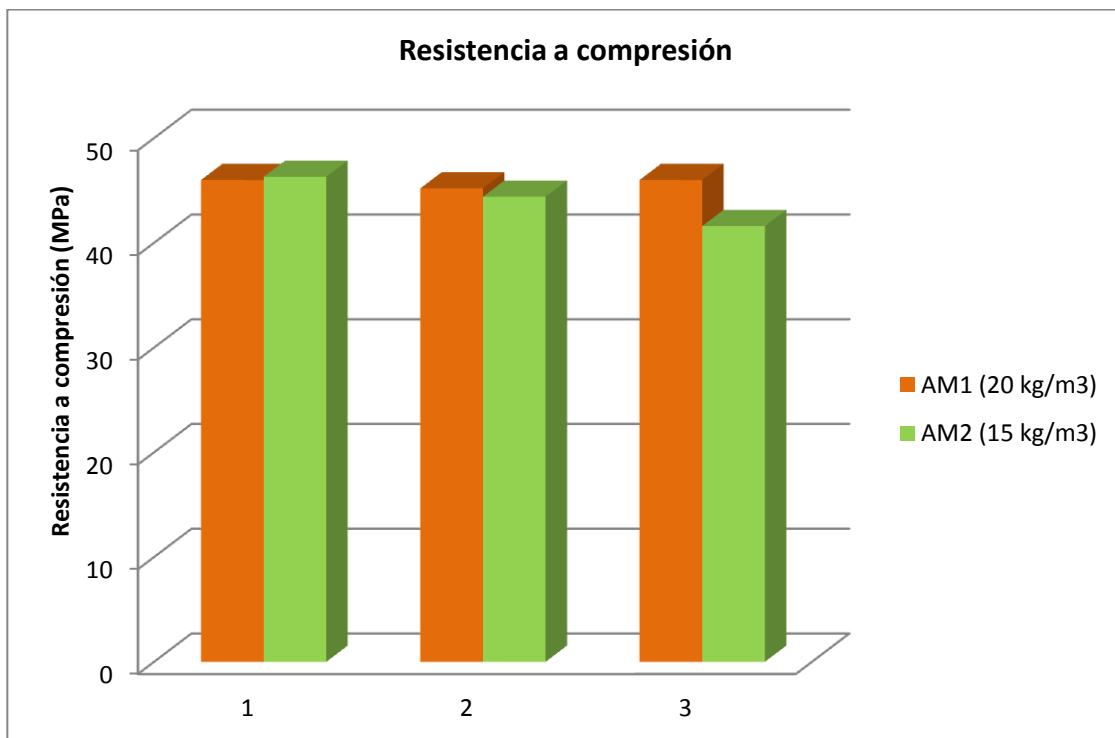


Figura 5.29 Resistencia a compresión (HRF con fibras metálicas DRAMIX 65/35)

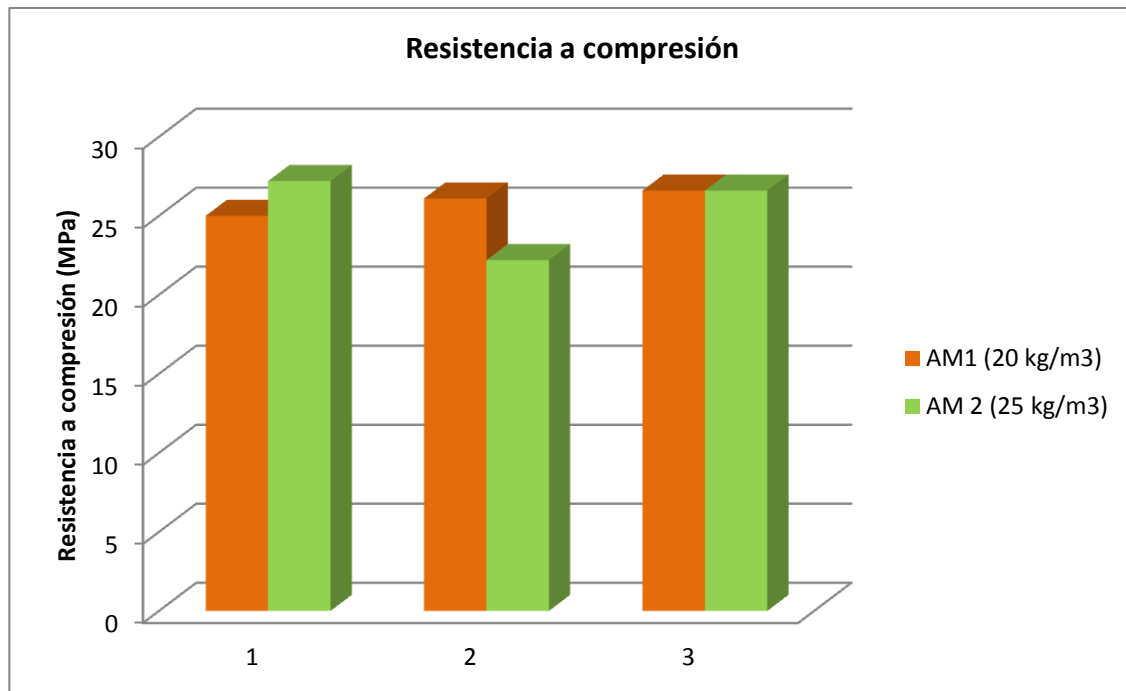


Figura 5.30 Resistencia a compresión (HRF con fibras metálicas DRAMIX 80/35)

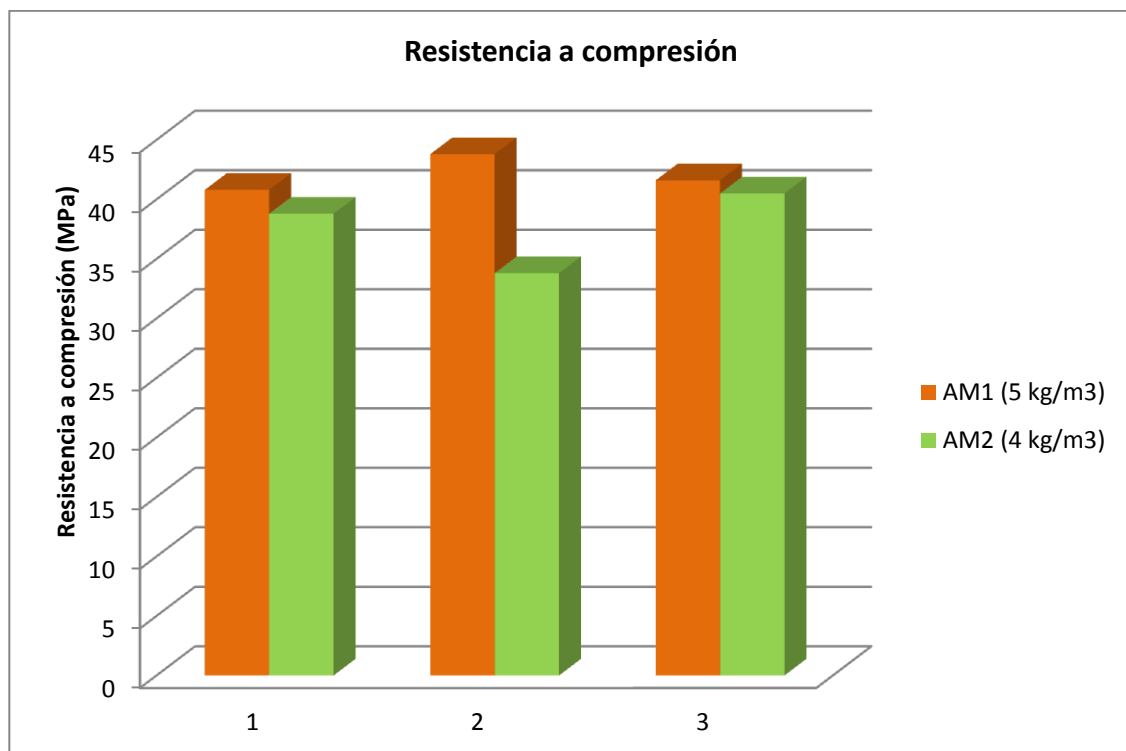


Figura 5.31 Resistencia a compresión (HRF con fibras plásticas ENDURO 600)

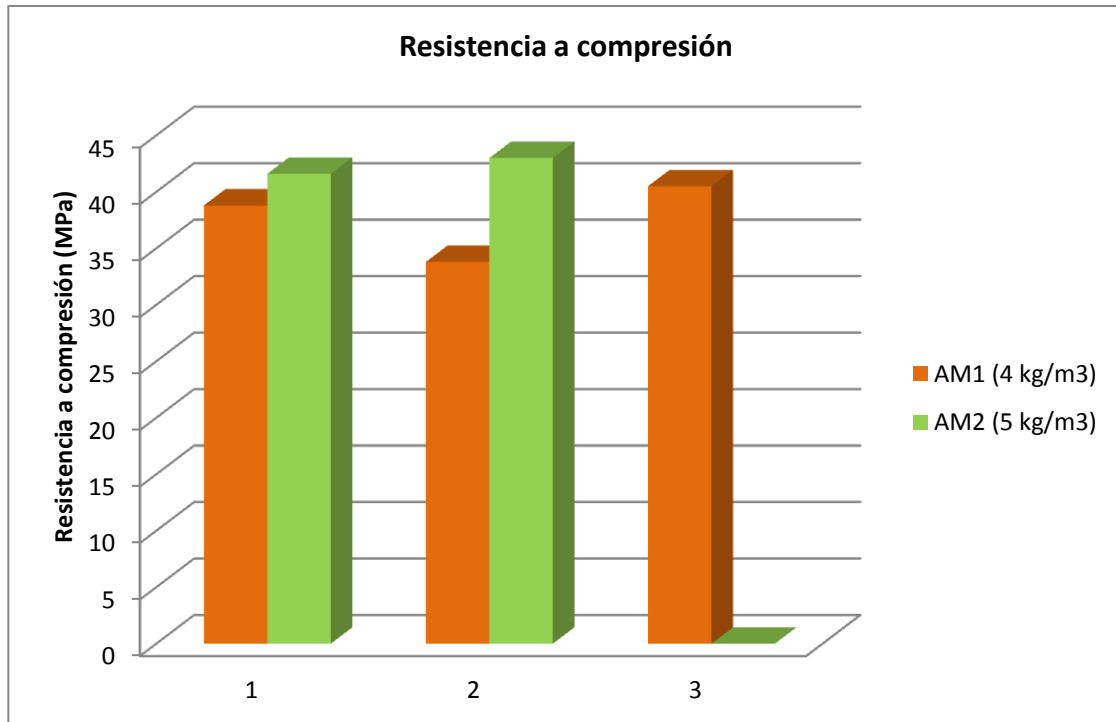


Figura 5.32 Resistencia a compresión (HRF con fibras plásticas SikaFiber M-48)

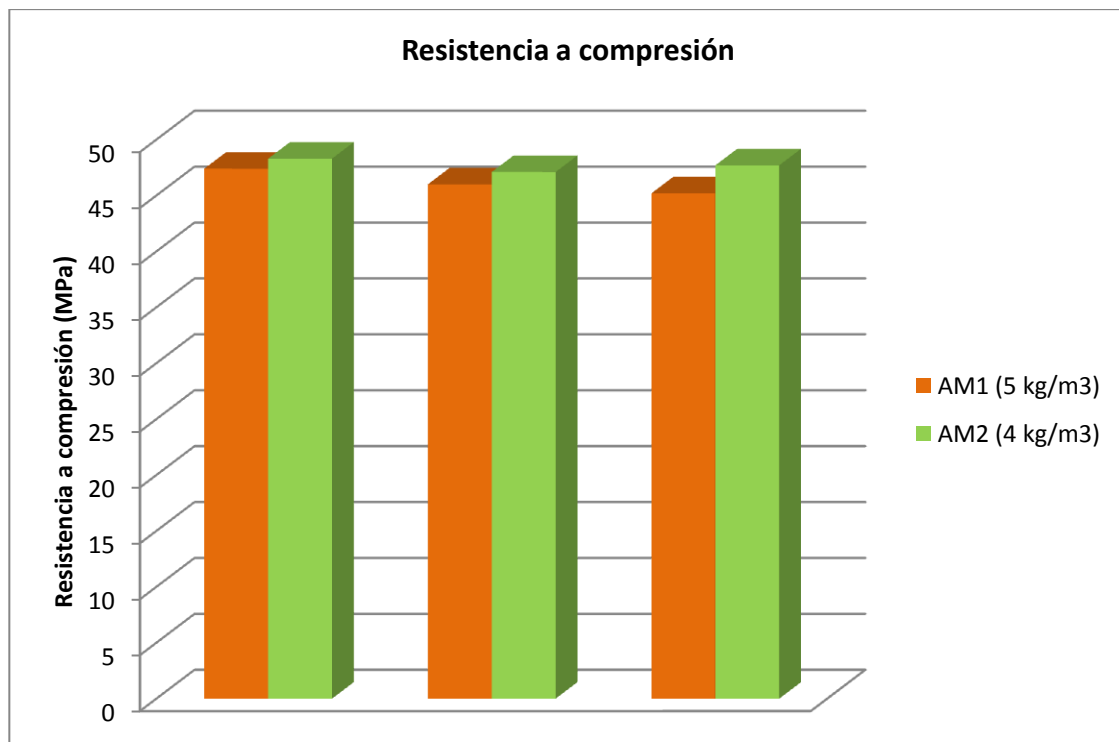


Figura 5.33 Resistencia a compresión (HRF con fibras de vidrio)

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos mediante en el ensayo de compresión, en cada una de las amasadas:

	PROBETA	DESCRIPCIÓN AMASADA	Kg/m3	FECHA DE AMASADO	FECHA DE ROTURA	Mpa	Tn	MEDIA	
								Mpa	Tn
AM 1	PROB. 1.1	Sin fibras	--	15.03.13	08.05.13	48,5	87	48,95	88
	PROB. 1.2					49,4	89		
AM1	PROB. 1.1	DRAMIX 65/35	20	12.04.13	15.05.13	46	83	45,73	82,5
	PROB. 1.2					45,2	81,5		
	PROB. 1.3					46	83		
AM2	PROB. 2.1	DRAMIX 65/35	15	12.04.13	15.05.13	46,3	83,5	44,10	79,50
	PROB. 2.2					44,4	80		
	PROB. 2.3					41,6	75		
AM1	PROB. 1.1	DRAMIX 80/35	20	19.04.13	28.05.13	25	45	25,9	44,67
	PROB. 1.2					26,1	47		
	PROB. 1.3					26,6	42		
AM2	PROB. 2.1	DRAMIX 80/35	25	19.04.13	28.05.13	27,2	49	25,33	45,67
	PROB. 2.2					22,2	40		
	PROB. 2.3					26,6	48		
AM1	PROB. 1.1	ENDURO 600	5	13.05.13	12.06.13	40,8	73,5	42,07	75,83
	PROB. 1.2					43,8	79		
	PROB. 1.3					41,6	75		
AM2	PROB. 2.1	ENDURO 600	4	13.05.13	12.06.13	38,8	70	37,7	68
	PROB. 2.2					33,8	61		
	PROB. 2.3					40,5	73		
AM1	PROB. 1.1	SikaFiber M-48	4	22.05.13	18.06.13	41,6	75	42,3	76,25
	PROB. 1.2					43	77,5		
AM2	PROB. 2.1	SikaFiber M-48	5	22.05.13	18.06.13	44,9	81	44,73	80,67
	PROB. 2.2					43,8	79		
	PROB. 2.3					45,5	82		
AM1	PROB. 1.1	Fibra de vidrio	5	24.05.13	20.06.13	47,4	85,5	46,2	83,33
	PROB. 1.2					46	83		
	PROB. 1.3					45,2	81,5		
AM2	PROB. 2.1	Fibra de vidrio	4	24.05.13	20.06.13	48,3	87	47,7	86
	PROB. 2.2					47,1	85		
	PROB. 2.3					47,7	86		
		MEDIA						40,97	73,67
		DESVIACIÓN TÍPICA						8,17	15,10
		COEFICIENTE DE VARIACIÓN						0,19	0,2

Figura 5.34 Tabla resumen de resultados a compresión

De la tabla superior, observamos que los resultados obtenidos con fibras metálicas 80/35, son inferiores a la media. Esto puede haber ocurrido debido a un fallo de dosificación desconocido en dichas amasadas.

Para entender los datos obtenidos en la tabla, hemos de remitirnos al artículo 31.3 de la EHE-08, en el que nos dice que la resistencia media a compresión a 28 días puede obtenerse como $f_{c,m} = f_{ck} + 8$ si las condiciones de ejecución son buenas.

La tabla superior, nos permite realizar un análisis comparativo de las resistencias características obtenidas y las resistencias esperadas.

Cada una de las resistencias características f_{ck} esperadas se obtienen en base a la siguiente fórmula:

$$\frac{A}{C} = k_1 \times f_{c,m} + k_2 = K$$

dónde:

$k_1 = 0,028$; es función del tipo de cemento y del tipo de árido, en nuestro caso, CEM I 42,5 R y áridos machacados.

$k_2 = 0,5$; es función del tipo de cemento.

Mientras que, las resistencias características f_{ck} obtenidas, como hemos dicho anteriormente, se obtienen a partir de la siguiente fórmula: $f_{ck} = f_{c,m} - 8$.

Por tanto, los valores obtenidos en la tabla superior representan la resistencia media de cada una de las probetas. Para obtener su resistencia característica f_{ck} es necesario aplicar la fórmula anteriormente descrita.

	f_{ck} (N/mm ²)	
	ESPERADA	OBTENIDA
AM 1 15.03.13 sin fibras	34,97	41
AM 2 03.04.14 sin fibras	34,95	--
AM 1 12.04.13 metálicas 65/35	34,97	37,7
AM 2 12.04.13 metálicas 65/35	34,97	36,1
AM 1 19.04.13 metálicas 80/35	34,97	17,9
AM 2 19.04.13 metálicas 80/35	34,98	17,3
AM 1 13.05.13 plásticas ENDURO 600	35	34,1
AM 2 13.05.13 plásticas ENDURO 600	34,99	29,7
AM 1 22.05.13 plásticas SikaFiber M-48	34,99	34,3
AM 2 22.05.13 plásticas SikaFiber M-48	35	36,7
AM 1 24.05.13 fibras de vidrio	35	38,2
AM 2 24.05.13 fibras de vidrio	34,99	39,7
MEDIA	34,98	32,17

Figura 5.35 Comparativa f_{ck} esperada y obtenida

Una vez explicado el origen de los datos obtenidos, primero de todo realizaremos un análisis preliminar de dichos datos con el fin de detectar los datos anómalos, es decir, los que se desvían mucho del conjunto y que por tanto deben ser rechazados antes de proceder al análisis completo de los resultados.

Como caso particular, hay que señalar que las resistencias obtenidas en las amasadas realizadas con fibras metálicas DRAMIX 80/35, han estado por debajo de la media. Por lo que, procederemos a su rechazo ya que se encuentran por debajo de los 25 N/mm², valor que la Instrucción considera como mínimo.

En general, hay que decir que la f_{ck} obtenida es mayor que la esperada en la mayoría de los casos. Excepto, en las dos amasadas del día 13.05.13 con fibras plásticas (ENDURO 600), en las que se han obtenido resistencias características ligeramente menores a las esperadas.

Aunque, en este caso, no procederemos a su rechazo ya que se encuentran por encima de los 25 N/mm², valor que la Instrucción considera como mínimo.

Comparando los datos obtenidos con la media de todos ellos, podemos concluir que se encuentran dentro de la misma, exceptuando los dos casos de fibras metálicas mencionados anteriormente, en los que su valor es inferior a la media obtenida.

Según dicha Instrucción la resistencia de proyecto $f_{c,k}$ en los hormigones estructurales, no será inferior a 25 N/mm² en hormigones armados o pretensados, aunque no sea éste nuestro caso, nos da una indicación de que las resistencias han sido demasiado bajas, como para considerarlas adecuadas. Por tanto podemos observar el cumplimiento de nuestro hormigón con la norma EHE-08 ya que el resultado medio de los ensayos a compresión nos da un valor de 40,97 N/mm².

6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En este apartado, se pretende comparar y analizar las resistencias residuales obtenidas con las probetas prismáticas sometidas a ensayos de flexotracción, en función del tipo de fibras y de su dosificación.

Dichas resistencias residuales se han obtenido aplicando a los datos derivados de las gráficas anteriores la fórmula dada en la UNE EN 14651.

De modo que, la resistencia residual a la tracción por flexión $f_{R,j}$ viene dada por la siguiente expresión:

$$f_{R,j} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2}$$

dónde:

$f_{R,j}$ es la resistencia residual a la tracción por flexión, correspondiente a CMOD = CMODj o $\delta = \delta_j$ (j = 1, 2, 3, 4), en Newtons por milímetro cuadrado.

F_j es la carga correspondiente a CMOD = CMODj o $\delta = \delta_j$ (j = 1, 2, 3, 4), en Newtons.

l es la longitud de vano, en milímetros.

b es la anchura de la probeta, en milímetros.

h_{sp} es la distancia entre el fondo de la entalla y la parte superior de la probeta, en milímetros.

Las resistencias residuales obtenidas, en cada una de las probetas, pertenecientes a la misma amasada son las siguientes:

Resistencia residual AM1 12.04.13 (N/mm ²)				
PROBETA	j=0,5 mm	j=1,5 mm	j=2,5 mm	j=3,5 mm
P1.1	3,52	2,99	3,24	2,96
P1.2	2,73	3,30	3,02	2,80
P1.3	2,38	2,61	2,52	2,26
MEDIA	2,88	2,97	2,93	2,67

Figura 6.1 Valores de resistencia residual obtenidos (Met. Dramix 65/35 20kg)

Resistencia residual AM2 12.04.13 (N/mm ²)				
PROBETA	j=0,5 mm	j=1,5 mm	j=2,5 mm	j=3,5 mm
P2.2	2,73	2,81	2,64	2,22
MEDIA	2,73	2,81	2,64	2,22

Figura 6.2 Valores de resistencia residual obtenidos (Met. DRAMIX 65/35 15kg)

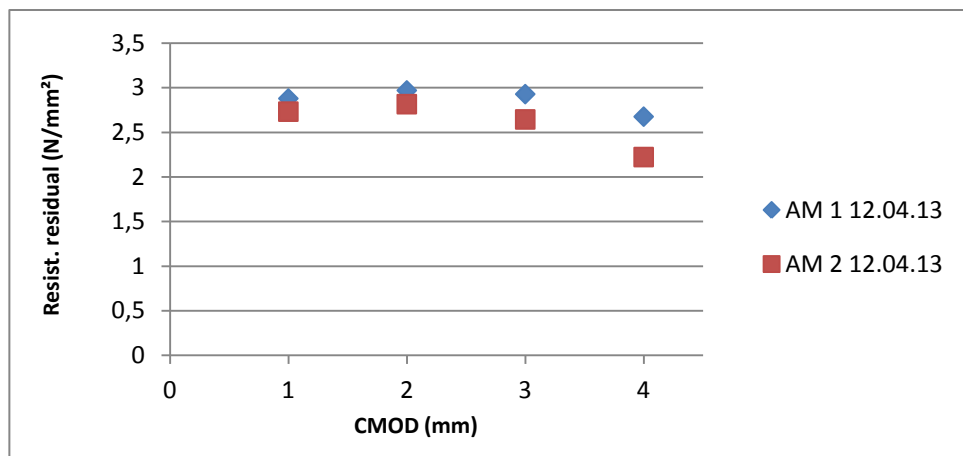


Figura 6.3 Gráfica resistencia residual-CMOD (Met. DRAMIX 65/35 20-15kg)

Resistencia residual AM1 19.04.13 (N/mm²)				
PROBETA	j=0,5 mm	j=1,5 mm	j=2,5 mm	j=3,5 mm
P1.1	1,45	1,72	1,68	1,60
P1.2	1,42	1,51	1,48	1,39
P1.3	1,75	1,62	1,49	1,36
MEDIA	1,54	1,61	1,55	1,45

Figura 6.4 Valores de resistencia residual obtenidos (Met. DRAMIX 80/35 20kg)

Resistencia residual AM2 19.04.13 (N/mm²)				
PROBETA	j=0,5 mm	j=1,5 mm	j=2,5 mm	j=3,5 mm
P2.1	1,46	1,41	1,38	1,30
P2.2	2,35	2,16	2,10	1,96
P2.3	2,34	2,28	2,16	1,96
MEDIA	1,91	1,78	1,74	1,63

Figura 6.5 Valores de resistencia residual obtenidos (Met. DRAMIX 80/35 25kg)

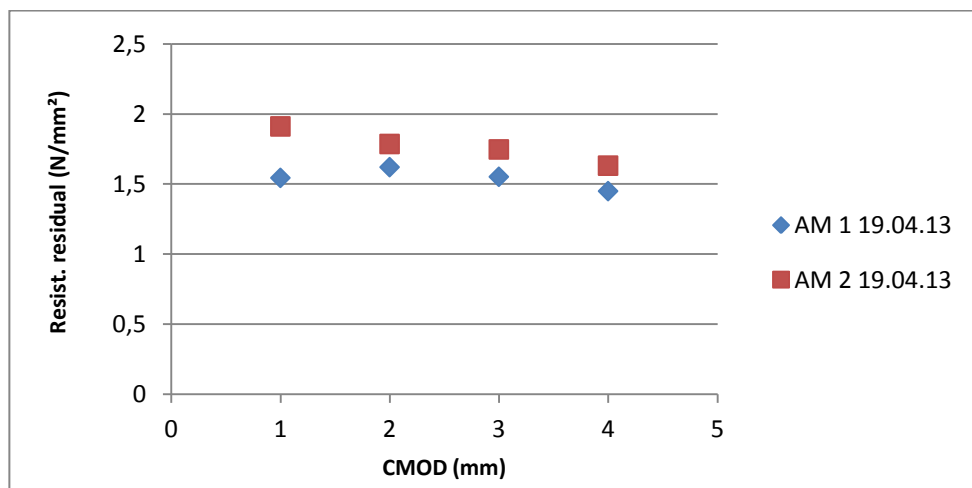


Figura 6.6 Gráfica resistencia residual-CMOD (Met. DRAMIX 80/35 20-25kg)

Resistencia residual AM1 13.05.13 (N/mm ²)				
PROBETA	j=0,5 mm	j=1,5 mm	j=2,5 mm	j=3,5 mm
P1.1	0,69	1,14	1,44	1,29
P1.2	0,48	0,82	1,09	1,28
MEDIA	0,58	0,98	1,26	1,28

Figura 6.7 Valores de resistencia residual obtenidos (Pl. ENDURO 600 5kg)

Resistencia residual AM2 13.05.13 (N/mm ²)				
PROBETA	j=0,5 mm	j=1,5 mm	j=2,5 mm	j=3,5 mm
P1.1	0,68	1,03	1,33	1,58
P1.2	0,66	1,03	1,28	1,47
P1.3	9,64	1,15	1,30	1,26
MEDIA	0,67	1,03	1,31	1,53

Figura 6.8 Valores de resistencia residual obtenidos (Pl. ENDURO 600 4kg)

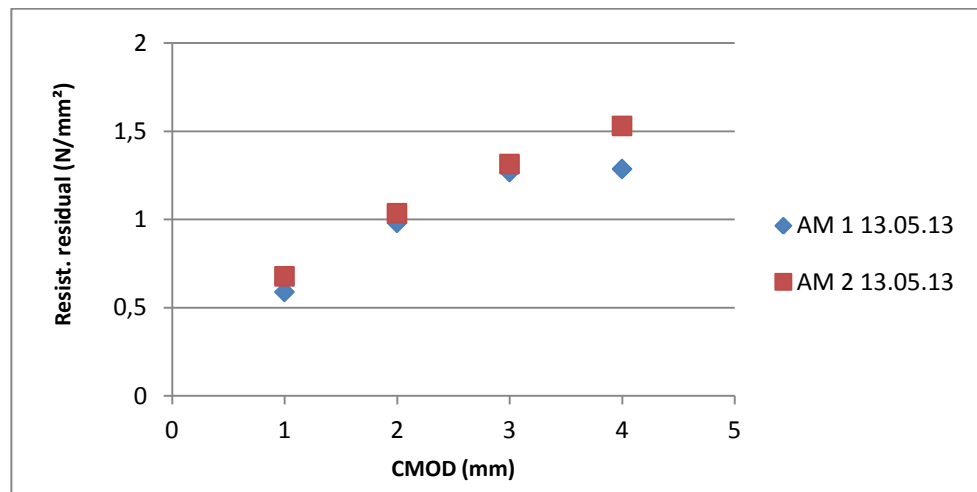


Figura 6.9 Gráfica resistencia residual-CMOD (Pl. ENDURO 600 5-4kg)

Resistencia residual AM1 22.05.13 (N/mm ²)				
PROBETA	j=0,5 mm	j=1,5 mm	j=2,5 mm	j=3,5 mm
P1.1	1,04	1,33	1,46	1,54
P1.2	0,33	0,88	1,06	1,13
P1.3	0,71	0,75	0,84	0,89
MEDIA	0,69	0,99	1,12	1,19

Figura 6.10 Valores de resistencia residual obtenidos (Pl. SikaFiber M-48 4kg)

Resistencia residual AM2 22.05.13 (N/mm ²)				
PROBETA	j=0,5 mm	j=1,5 mm	j=2,5 mm	j=3,5 mm
P2.1	0,82	0,90	1,04	0,86
P2.2	0,95	1,26	1,44	1,51
P2.3	0,90	1,08	1,22	1,31
MEDIA	0,88	1,08	1,24	1,19

Figura 6.11 Valores de resistencia residual obtenidos (Pl. SikaFiber M-48 5kg)

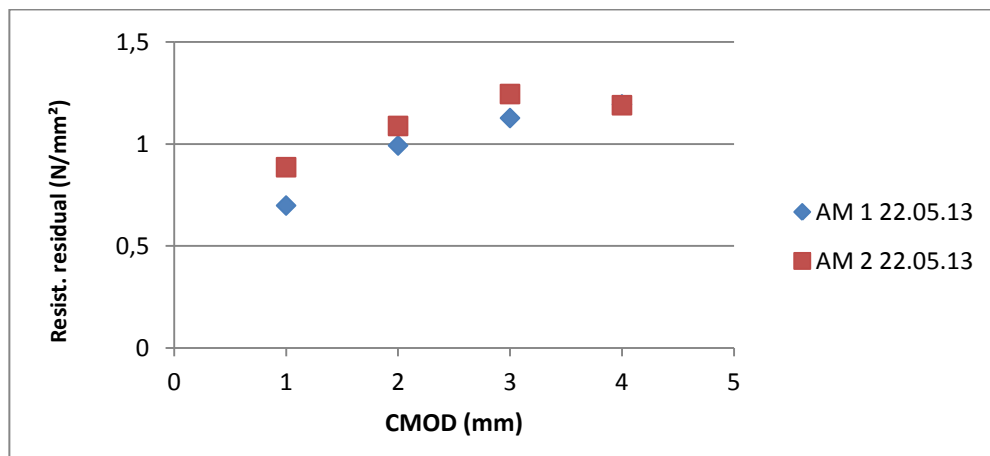


Figura 6.12 Gráfica resistencia residual-CMOD (Pl. SikaFiber M-48 4-5kg)

A continuación se representan, los valores medios obtenidos de cada una de las amasadas:

	Resistencia residual media (N/mm ²)			
	j=0,5 mm	j=1,5 mm	j=2,5 mm	j=3,5 mm
AM 1 12.04.13	2,88	2,97	2,93	2,67
AM 2 12.04.13	2,73	2,81	2,64	2,22
AM 1 19.04.13	1,54	1,62	1,55	1,45
AM 2 19.04.13	1,91	1,78	1,74	1,63
AM 1 13.05.13	0,58	0,98	1,26	1,28
AM 2 13.05.13	0,67	1,03	1,31	1,53
AM 1 22.05.13	0,69	0,99	1,12	1,19
AM 2 22.05.13	0,88	1,08	1,24	1,19

Figura 6.13 Valores de resistencia residual media

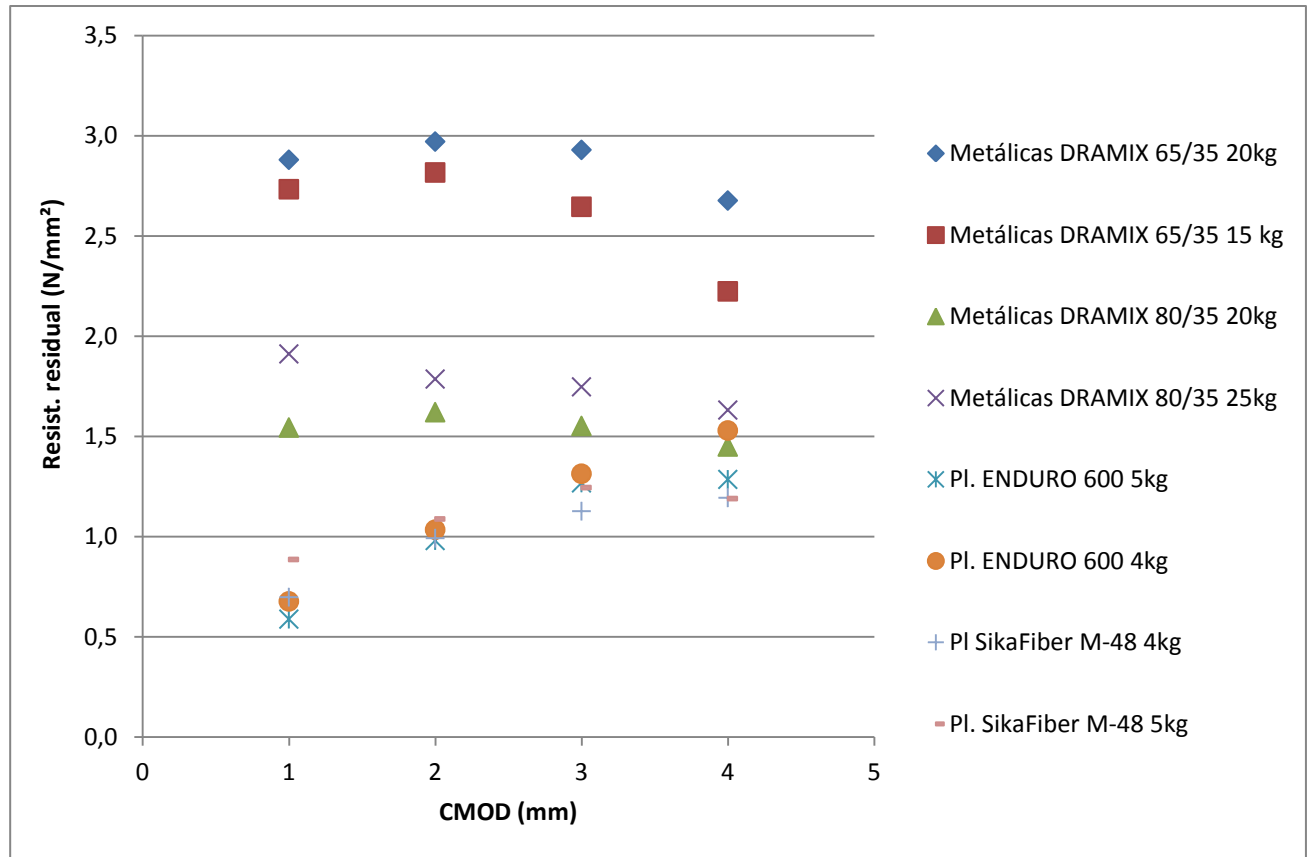


Figura 6.14 Gráfica resistencia residual-CMOD media

De las gráficas obtenidas podemos sacar varias conclusiones en función del tipo de fibras empleado.

Podemos observar dos comportamientos distintos de las fibras metálicas.

Por una parte, se observa que el valor de resistencia residual máximo, mediante la adición de fibras metálicas del tipo Dramix 65/35 (AM 1-2 12.04.13), se alcanza en $CMOD_2=1,5$ mm, en función del desplazamiento en el borde de la fisura con un valor de $2,97 \text{ N/mm}^2$, decreciendo hasta $CMOD_4=3,5$ mm, punto en que la resistencia residual alcanzada es menor con respecto a los demás.

Por otra parte, con fibras metálicas Dramix 80/35, correspondientes a las amasadas 1 y 2 del 19.04.13, la resistencia residual alcanzada en $CMOD_4=3,5$ mm es menor, aproximadamente de unos $1,55 \text{ N/mm}^2$. Además, no se observa un comportamiento decreciente de dicha resistencia, más bien se mantiene lineal en cada uno de los cuatro puntos estudiados. Como hemos apuntado en apartados anteriores, esto puede haber ocurrido debido a una mala dosificación de las amasadas.

Contrariamente, a lo que ocurre con fibras metálicas, las amasadas con fibras plásticas, tienen un comportamiento similar entre ellas. Tal y como se observa en la gráfica superior la diferencia es prácticamente indetectable.

Otra de las diferencias, con respecto a las fibras metálicas, radica en el valor de la resistencia residual alcanzada, con un máximo de $1,31 \text{ N/mm}^2$. Además, dicha resistencia es creciente a medida que aumenta el desplazamiento, algo que no ocurre con las fibras metálicas.

Por lo que, se puede concluir que mediante la adición de fibras metálicas la resistencia residual máxima se ha alcanzado con una abertura de fisura de 1,5 mm, correspondiente a $CMOD_2$, y ha sido decreciente a partir de dicho punto. Mientras que, con la utilización de fibras plásticas, la resistencia residual alcanzada es menor, pero la recuperación es creciente a medida que se aumenta el desplazamiento en el borde de la fisura.

Otra de las conclusiones extraídas, en base a la Norma UNE EN 14845-2, en la que nos dice que “ El contenido de fibras debe determinarse para obtener una resistencia residual media de al menos, 1,5 MPa a 0,5 CMOD y una resistencia residual a flexión media de al menos 1 MPa a 3,5 CMOD.”, es que el contenido de fibras utilizado en las cuatro primeras amasadas, correspondientes a fibras metálicas, ha sido suficiente para alcanzar una resistencia residual de 1,5 MPa en $CMOD_1$, alcanzando un valor máximo, como hemos indicado anteriormente de 2,97 MPa (N/mm²). Mientras que, el contenido de fibras plásticas usado no ha sido suficiente para alcanzar dicha resistencia residual en $CMOD_1$.

En cuanto a $CMOD_4=3,5$ mm, podemos observar que la cantidad de fibras, en este caso, si ha sido suficiente para alcanzar el valor indicado en la norma UNE EN 14845-2, siendo éste superior a 1MPa en todos los casos.

Otro de los factores que también es relevante a la hora de valorar los resultados obtenidos, es la cuantificación de las fibras tras su rotura, ya que su situación puede explicar los valores de resistencia residual obtenidos.

Finalmente, decir que no se han podido obtener datos de resistencias residuales con fibras de vidrio, ya que como hemos visto en el apartado 5 (Resultados tras el ensayo en el laboratorio de las probetas), las gráficas de carga-desplazamiento no nos permitían obtener resultados de la abertura de fisura, ya que su rotura era inmediata, presentando un comportamiento frágil, similar al del hormigón de referencia. Esto es debido a que las fibras utilizadas eran demasiado cortas para el fin propuesto, es decir, para resistir estructuralmente.

7 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

7.1 Conclusiones

En base al trabajo realizado anteriormente se exponen las siguientes conclusiones:

- Los HRF se utilizan más cada día debido a las ventajas que ofrecen para su aplicación.
- La resistencia a compresión del hormigón reforzado, no se ve afectada por la adición de las mismas, sean del tipo que sean.
- En flexotracción la adición de fibras de acero al hormigón aumenta su resistencia y cambia el comportamiento de rotura frágil a una rotura dúctil.
- Los hormigones con fibras de acero pueden trabajar estructuralmente, incluso pueden sustituir al acero convencional en muchas aplicaciones.
- En función del tipo de fibras, se obtiene unas determinadas resistencias residuales, capaces de soportar un determinado esfuerzo a flexotracción. De modo que, con fibras metálicas se ha comprobado que las resistencias residuales obtenidas son mayores que mediante la adición de fibras plásticas, ya que la recuperación en éstas últimas es menor.
- Se ha comprobado que la cantidad de fibras metálicas añadidas ha sido suficiente para conseguir una resistencia de 1,5 MPa en $CMOD_1$, tal y como indica la norma UNE EN 14845-2.
- Es necesario una mayor adición de fibras plásticas para conseguir 1,5 MPa en $CMOD_1$.
- Con fibras de vidrio se han obtenido resistencias residuales nulas, esto nos lleva a concluir que este tipo de fibras no son aptas para resistir estructuralmente y se deben utilizar en otras aplicaciones.
- También se ha comprobado, que la utilización de fibras de vidrio, nos obligaba a añadir más aditivo para conseguir la consistencia deseada.
- Los aspectos negativos de las fibras de acero en comparación con las fibras de vidrio y polipropileno es que son más costosas, disminuyen la trabajabilidad del hormigón y pueden dar lugar a la formación de erizos (bolas de fibra sin hormigón en su interior), lo que no limita su utilización, con las medidas preventivas adecuadas para evitar este problema.
- Con respecto a la durabilidad, la presencia de las fibras permite una mejor redistribución de las fisuras.

7.2 Futuras líneas de investigación

En cuanto a líneas futuras, tenemos muchos campos en los que podríamos seguir investigando con las fibras, por ejemplo como en los siguientes:

- Es necesario profundizar más en cómo se cuantifica el efecto de ciertos tipos de fibras, como las de vidrio, a través de los distintos parámetros que caracterizan la resistencia estructural del hormigón.
- Estudio de otras propiedades, como la fluencia o la retracción, que pueden verse beneficiadas de las fibras de vidrio o de plástico, que a la vista de los resultados no son óptimas como refuerzo estructural.
- Deberíamos hacer cálculos presupuestarios en cada obra de hormigón armado para ver si es más económico incorporar las fibras en hormigones convencionales para mejorar sus propiedades ante sollicitaciones de tracción. Con ello podríamos reducir la cantidad de acero de refuerzo que gastamos en las estructuras de hormigón sustituyendo dicho acero de refuerzo por fibras junto a una cantidad menor de acero en la estructura.

8 ESTUDIO PRESUPUESTARIO

- **Recopilación de datos y cálculos previos:**

Amasadas realizadas: 2 amasadas sin fibras (hormigón de referencia)

10 amasadas con fibras

TOTAL: 12 amasadas

Cemento: 26,63 kg/amasada

Arena: 76,50 kg/amasada

Árido 7/12: 17,11 kg/amasada y 3,13 kg/amasada

Árido 4/7: 75,40 kg/amasada y 60 kg/amasada

Aditivo: 0,18 kg/amasada (0,7% en peso de cemento)

Filler: 0,76 kg/amasada

Agua: 14 kg/amasada

Fibras de acero:

DRAMIX 65/35: 1,52 kg/amasada y 1,14 kg/amasada

DRAMIX 80/35: 1,52 kg/amasada y 1,90 kg/amasada

Fibras plásticas:

ENDURO 600: 0,38 kg/amasada y 0,30 kg/amasada

SikaFiber M-48: 0,38 kg/amasada y 0,30 kg/amasada

Fibras de vidrio: 0,38 kg/amasada y 0,30 kg/amasada

Probetas: 35 probetas cilíndricas 15Ø x30cm

37 probetas prismáticas 15x15x60 cm

Horas de técnico de laboratorio:

Amasadas (hormigón de referencia y con fibras): 0,5h preparación y pesaje

0,25h amasado

0,5h limpieza

TOTAL: 1,25h/amasada dosificación

Desmoldear probetas: 0,25h/probeta prismática

0,1h/probeta cilíndrica

Ensayar probetas: 0,75h/probeta prismática a flexotracción

0,1h/probeta cilíndrica a compresión

CÓDIGO	RESUMEN	PARTES IGUALES	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
CAPÍTULO 01 PFG_HORMIGÓN CON FIBRAS					
P01.1	m3 Agua.	12	0,014	1,89	
					0,32
P01.2	t Cemento portland CEM I 42'5R, según norma UNE-EN 197-1:2000 a granel.	12	0,02663	98,11	
					31,35
P01.3	kg Aditivo fluidificante para hormigones de calidad y difícil puesta en obra, y en hormigón bombeado, suministrado en envases de 30 kg.	12	0,18	1,66	
					3,59
	t Arena triturada de naturaleza silíceas, sin lavar, de granulometría 0/4, a pie de obra, considerando transporte con camión de 25t, a una distancia media de 30 km.	12	0,0765	14,83	
					13,61
P01.4	t Grava triturada caliza de granulometría 7/12, lavada, a pie de obra, considerando transporte con camión de 25t, a una distancia media de 30 km.	10	0,01711	16,45	
					2,81
	t Grava triturada caliza de granulometría 7/12, lavada, a pie de obra, considerando transporte con camión de 25t, a una distancia media de 30 km.	2	0,00313	16,45	
					0,10
P01.5	t Grava triturada caliza de granulometría 4/7, lavada, a pie de obra, considerando transporte con camión de 25t, a una distancia media de 30 km.	10	0,0754	15,85	
					11,95
	t Grava triturada caliza de granulometría 4/7, lavada, a pie de obra, considerando transporte con camión de 25t, a una distancia media de 30 km.	2	0,06	15,85	
					1,90
P01.6	t Filler de aportación.	12	0,00076	74,66	
					0,68
	kg Fibras de acero.				
P01.7	DRAMIX 65/35	1	2,66	2,5	
					6,65
P01.8	DRAMIX 80/35	1	3,42	2,5	
					8,55

P01.9	kg Fibras de plástico. ENDURO 600	1	0,68	6,23	
					4,24
P01.10	SikaFiber M-48	1	0,68	10,75	
					7,31
P01.11	kg Fibras de vidrio.	1	0,68	3,69	
					2,51
P01.12	l Desencofrante para moldes de hierro formulado en base aceite.	1	4	1,98	
					7,92
P01.13	u Par de guantes para riesgos mecánicos fabricados en algodón tejido punzonado con refuerzo de serraje vacuno en la palma, con certificado CE.	2	1	3,47	
					6,94
P01.14	h Técnico de laboratorio Descomposición				
	Amasadas (hormigón con fibras y sin fibras)	12	1,25	7,5	112,5
	Desmoldear probeta prismática	37	0,25	7,5	69,38
	Desmoldear probeta cilíndrica	35	0,1	7,5	26,25
	Ensayar probeta prismática a flexotracción	37	0,75	7,5	208,13
	Ensayar probeta cilíndrica a compresión	35	0,1	7,5	26,25
					442,5
TOTAL CAPÍTULO 01 PFG_HORMIGÓN CON FIBRAS					552,94
Estimación Costes Indirectos			13%		624,82
IVA			21%		756,03
TOTAL					756,03

9 **BIBLIOGRAFÍA**

1. (2008). Anejo 14 EHE, Recomendaciones para la utilización de Hormigones con Fibras.
2. (2008). UNE EN 14651. "Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual)".
3. (2009). UNE EN 12390-3. "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas".
4. (2009). UNE EN 12390-5. "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas".
5. (2008). UNE EN 14845-1. "Método de ensayos para fibras de hormigón. Parte 1: Hormigones de referencia".
6. (2008). UNE EN 14845-2. "Método de ensayos para fibras de hormigón. Parte 2: Efecto en la resistencia del hormigón".
7. (2008). UNE EN 14889-1. "Fibras para hormigón. Parte 1: Fibras de acero. Definiciones, especificaciones y conformidad".
8. (2008). UNE EN 14889-2. "Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras poliméricas. Definiciones, especificaciones y conformidad".
9. (2008). ASTM C1116/C1116M. "Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete".
10. (2010). ACI Committee 544. "Report on the Physical Properties and Durability of Fiber-Reinforced Concrete".
11. (2005). ACI Committee 116. "Cement and Concrete Terminology".
12. (2008). Estefanía Cuenca Asensio. Trabajo de investigación. "Hormigón autocompactante y hormigón reforzado con fibras".
13. (2010). Patricia Cristina Mármol Salazar. Trabajo Fin de Máster. "Hormigones con fibras de acero. Características Mecánicas."
14. M. Fernández Cánovas. Dr. Ingeniero de Construcción. "Hormigones reforzados con fibras de acero."

10 ANEJO DE GRÁFICOS

10.1 FIBRAS METÁLICAS 65/35

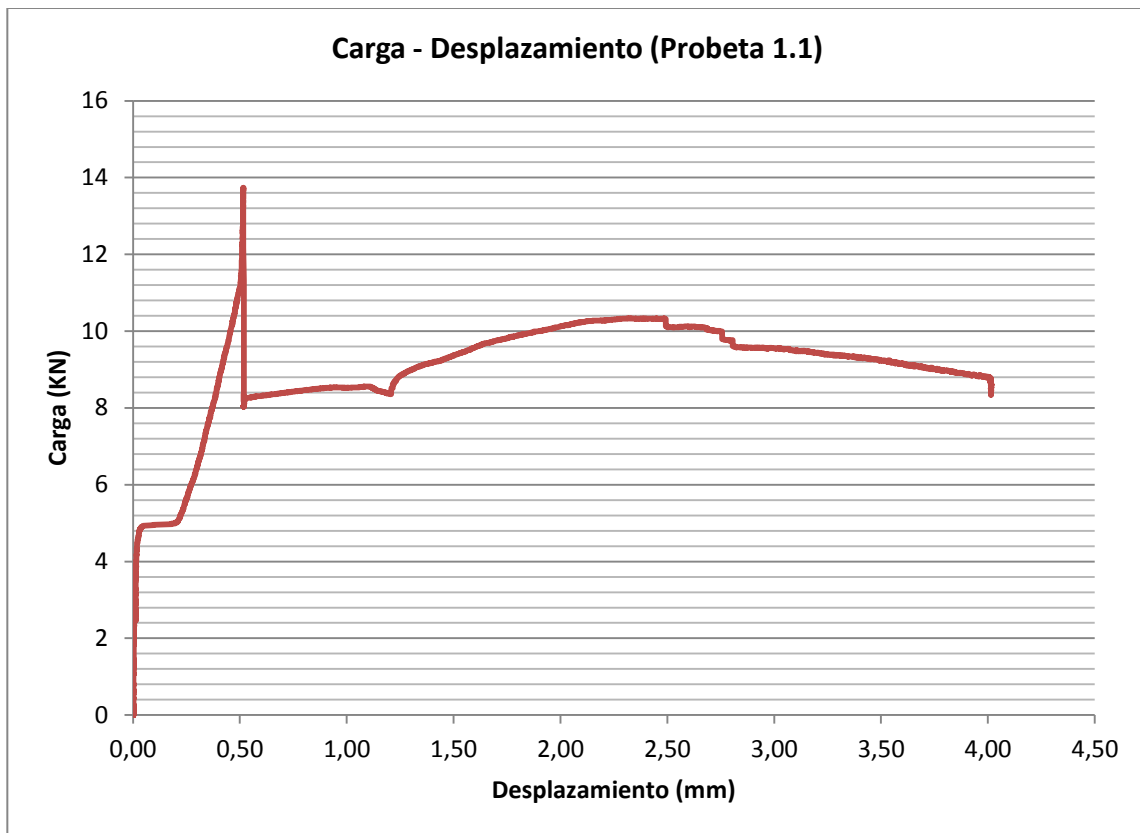


Figura 10.1 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 20 kg/m³)

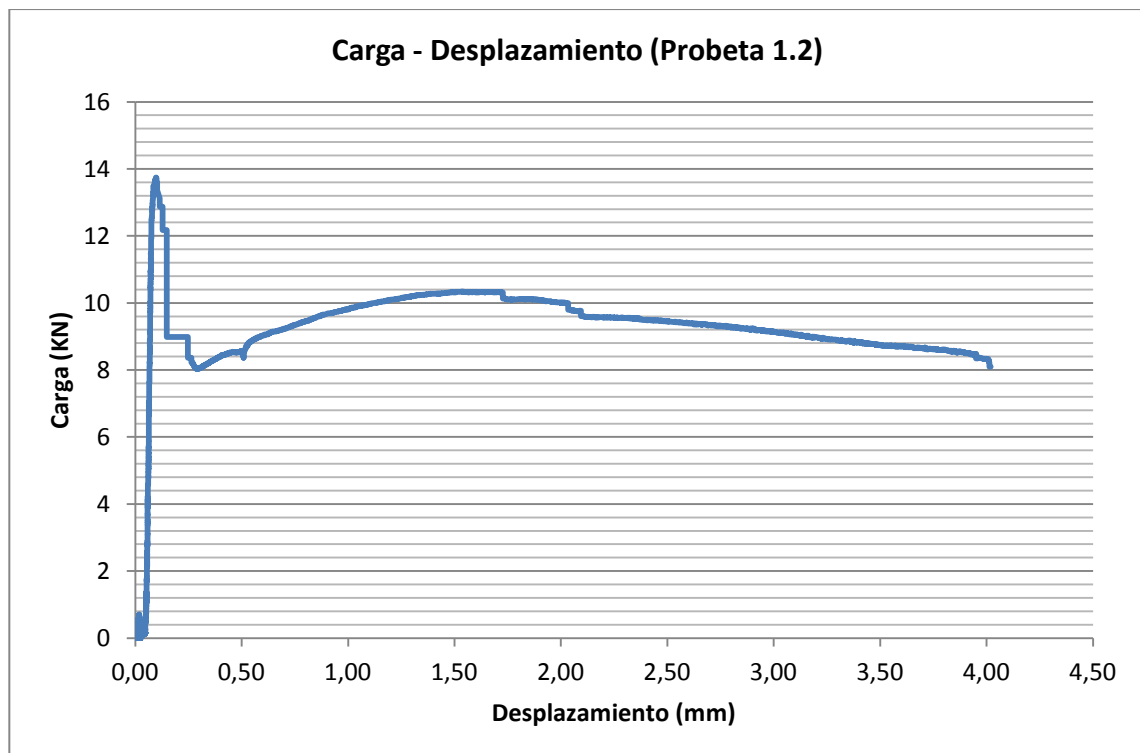


Figura 10.2 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 20 kg/m³)

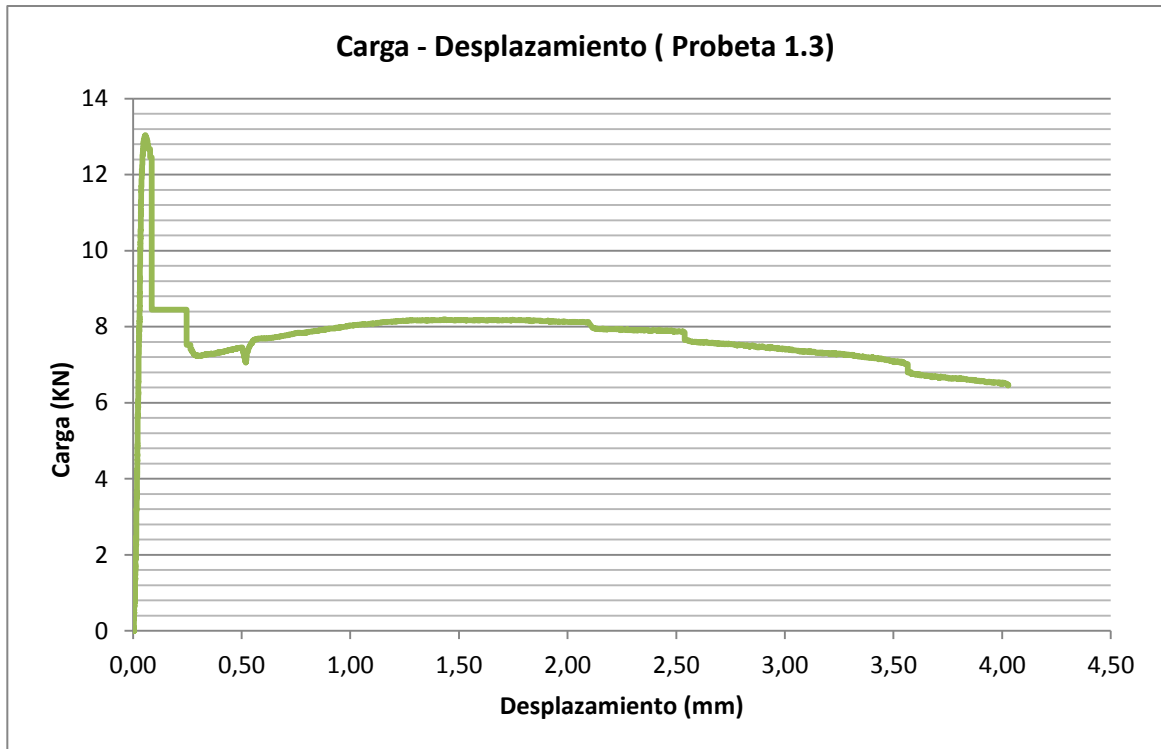


Figura 10.3 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 20 kg/m³)

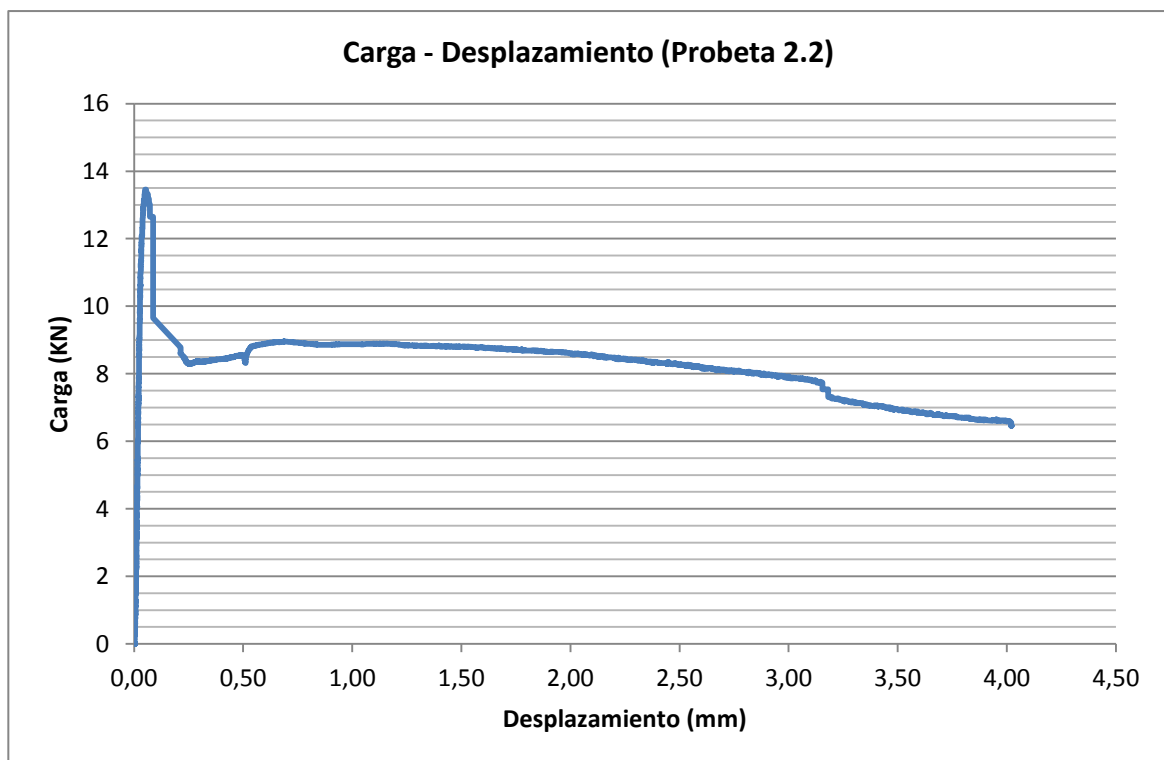


Figura 10.4 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 15 kg/m³)

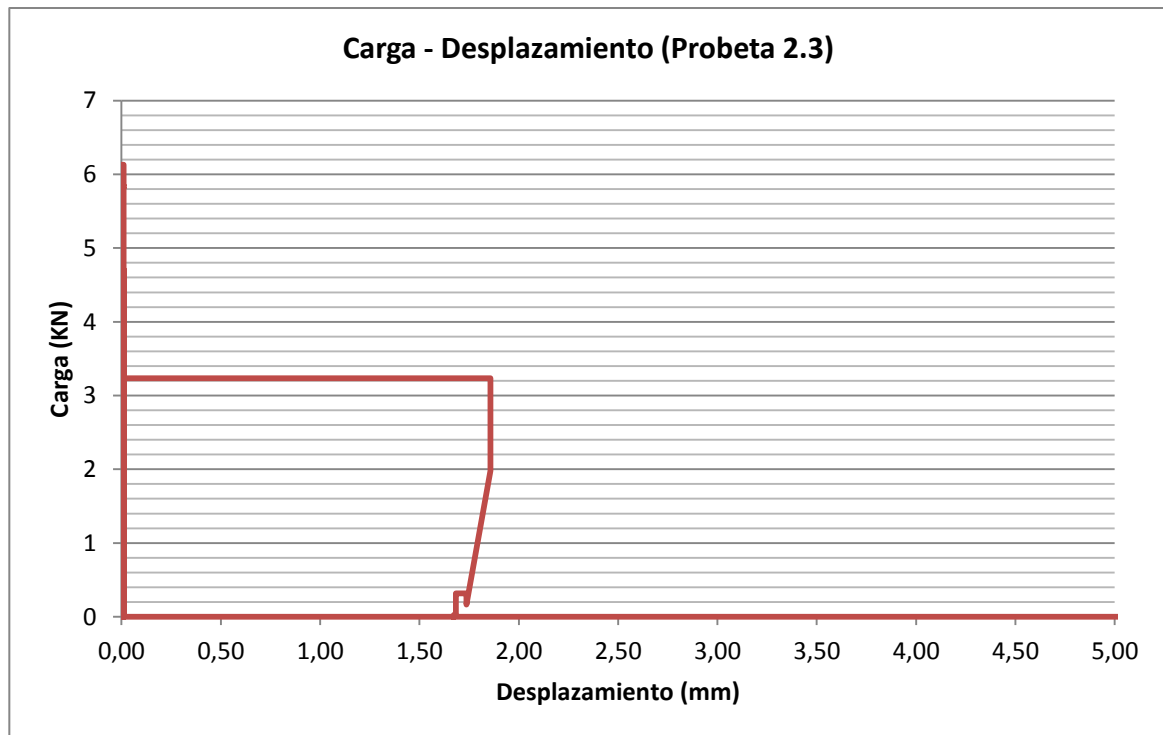


Figura 10.5 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 15 kg/m³)

10.2 FIBRAS METÁLICAS 80/35

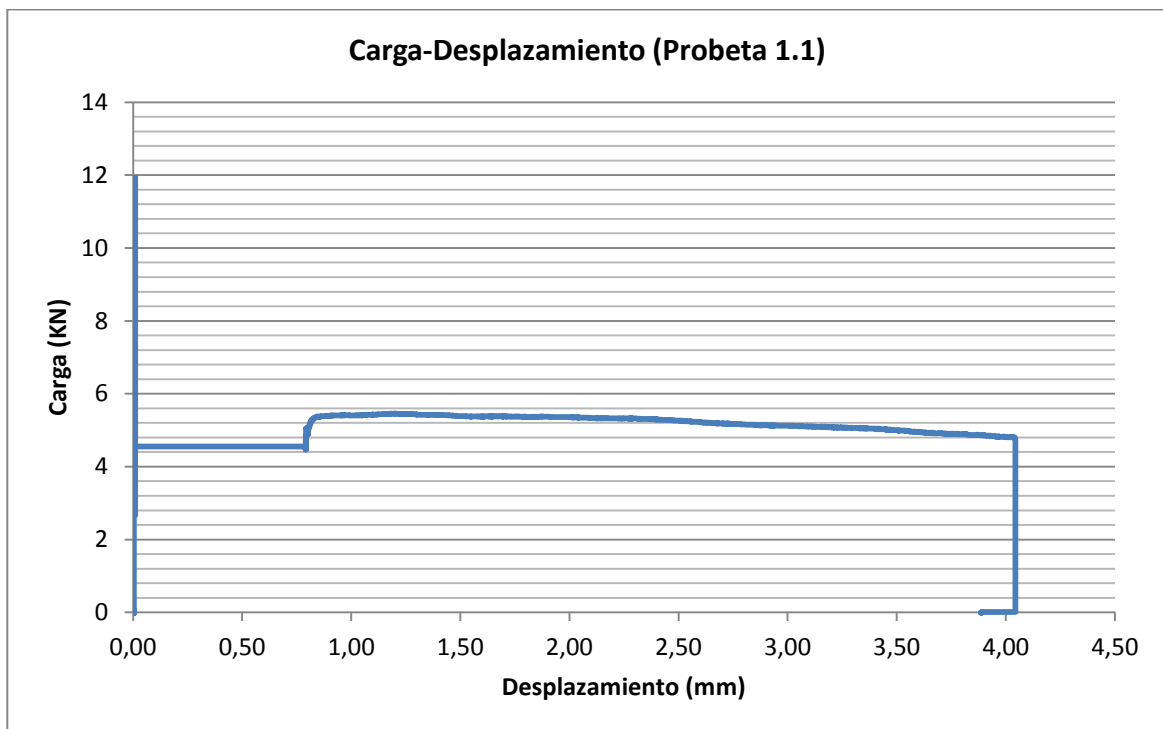


Figura 10.6 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 20 kg/m³)

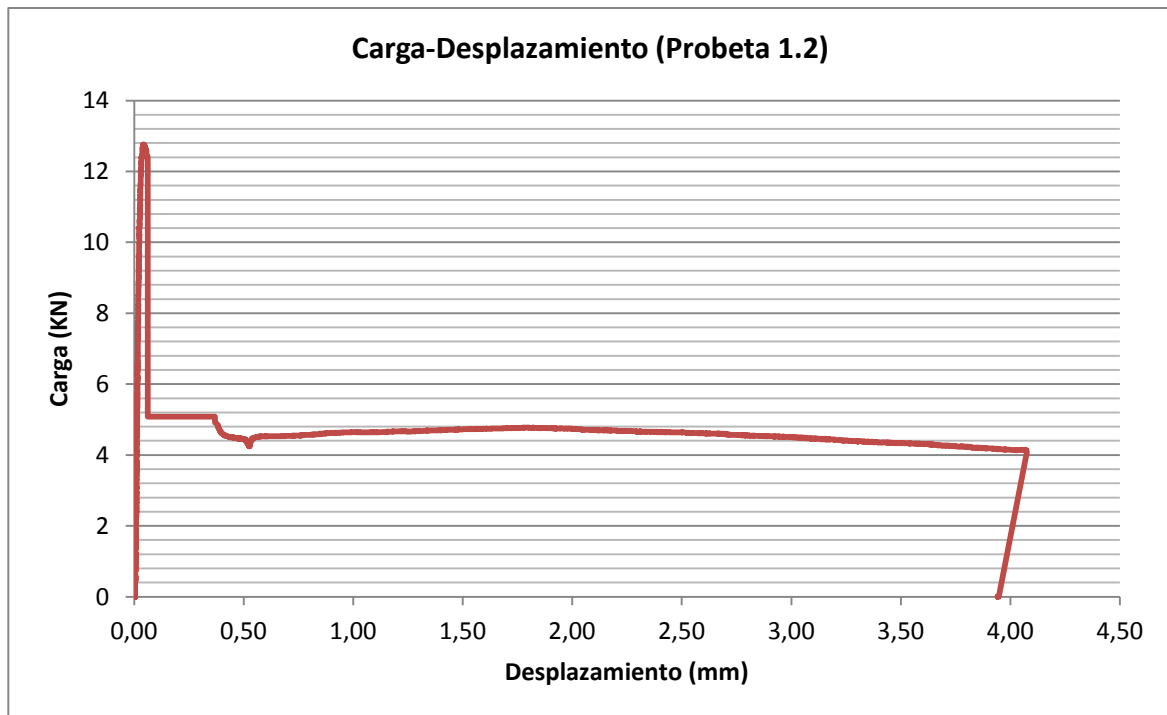


Figura 10.7 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 20 kg/m³)

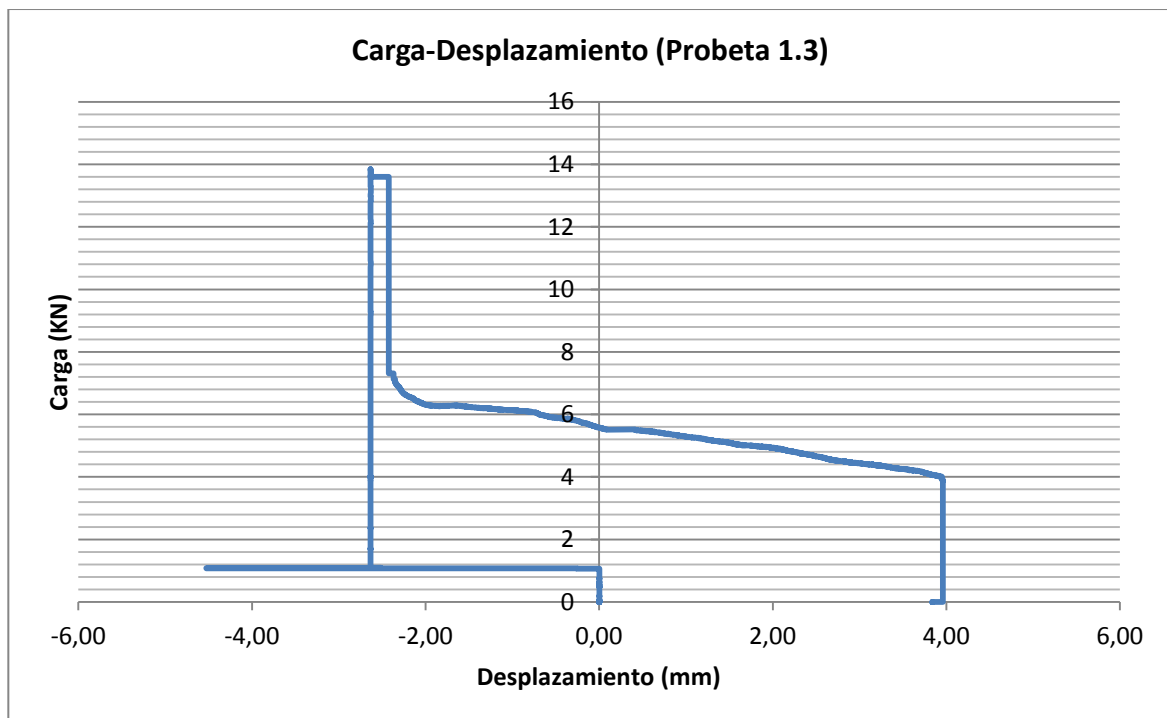


Figura 10.8 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 20 kg/m³)

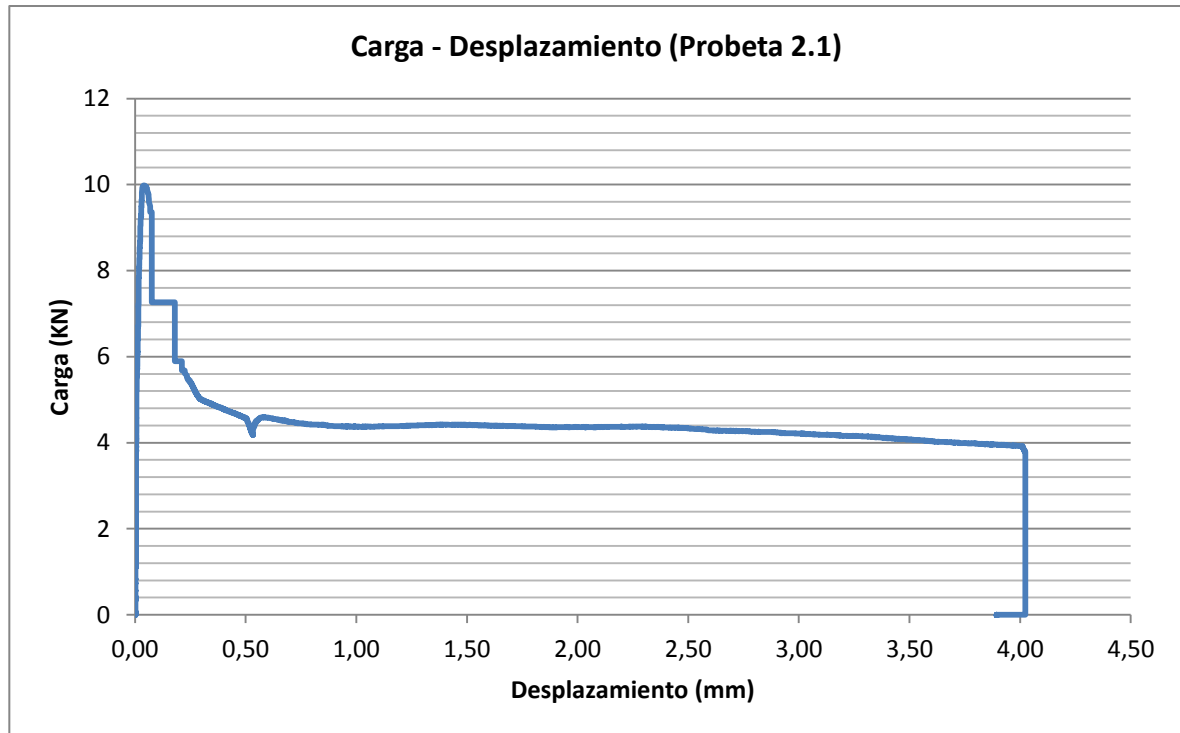


Figura 10.9 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 25 kg/m³)

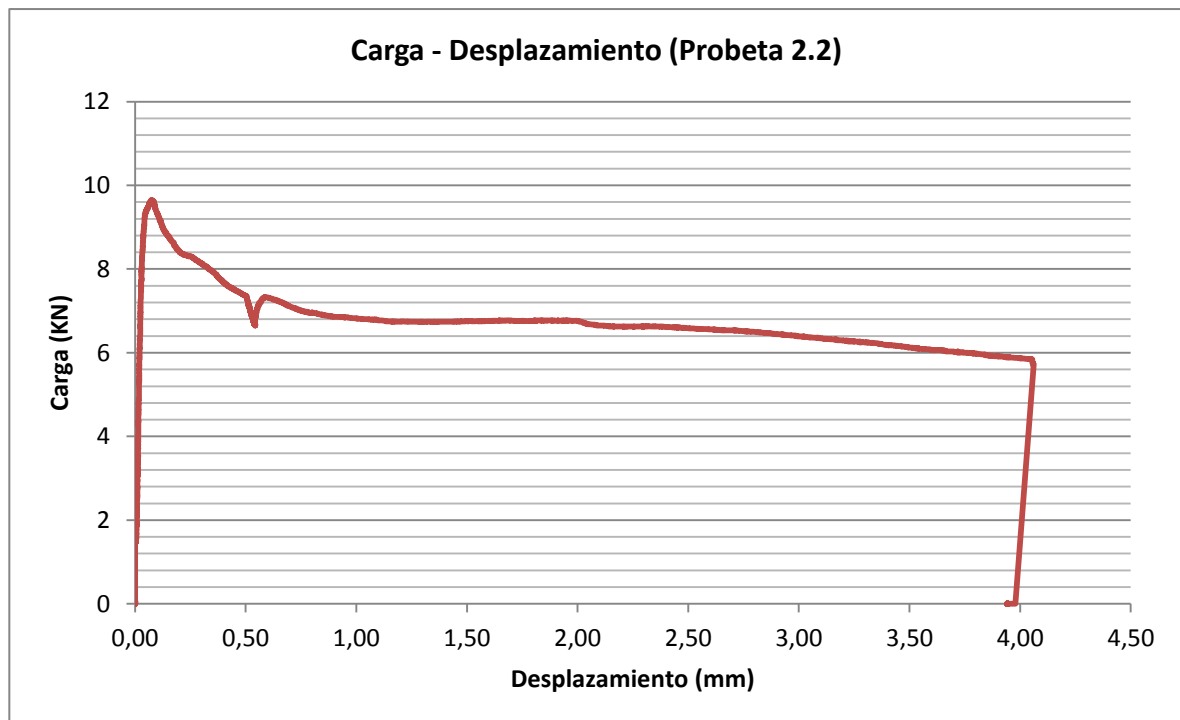


Figura 10.10 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 25 kg/m³)

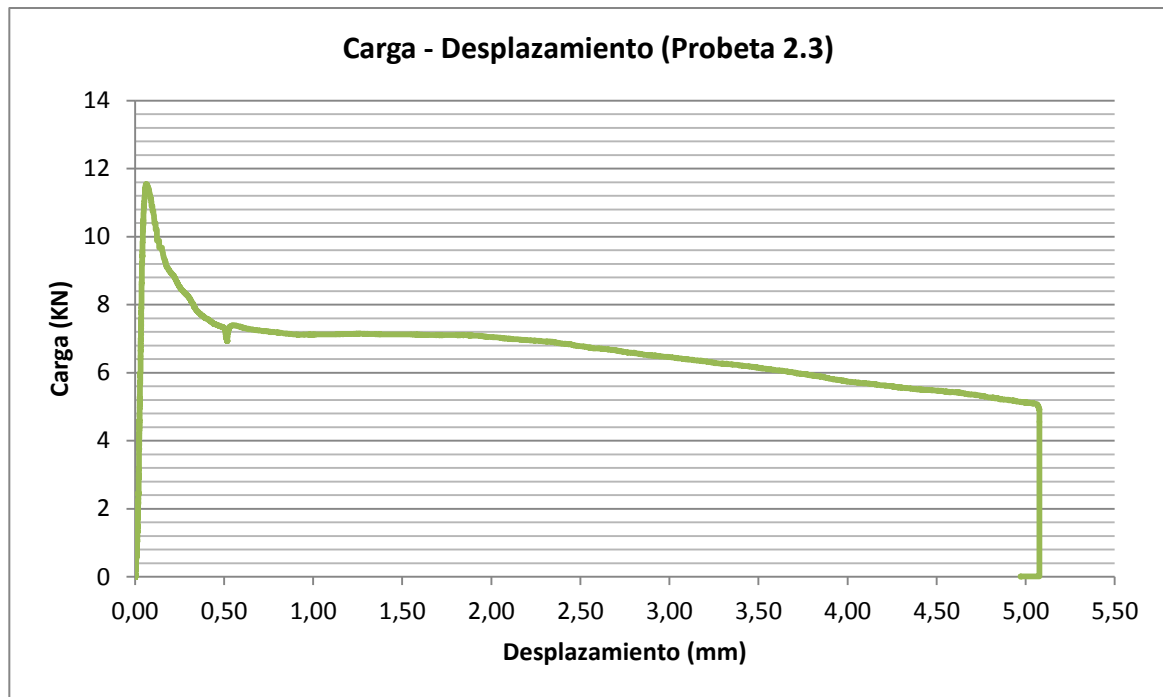


Figura 10.11 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 25 kg/m³)

10.3 FIBRAS PLÁSTICAS ENDURO 600

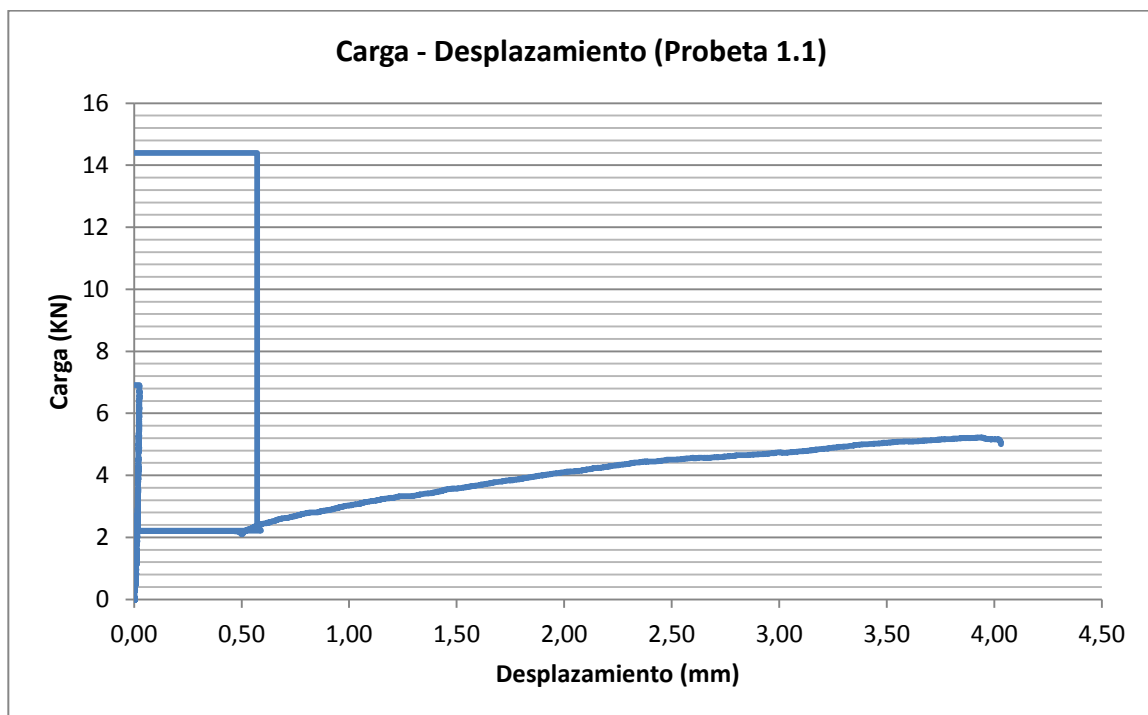


Figura 10.12 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 5 kg/m³)

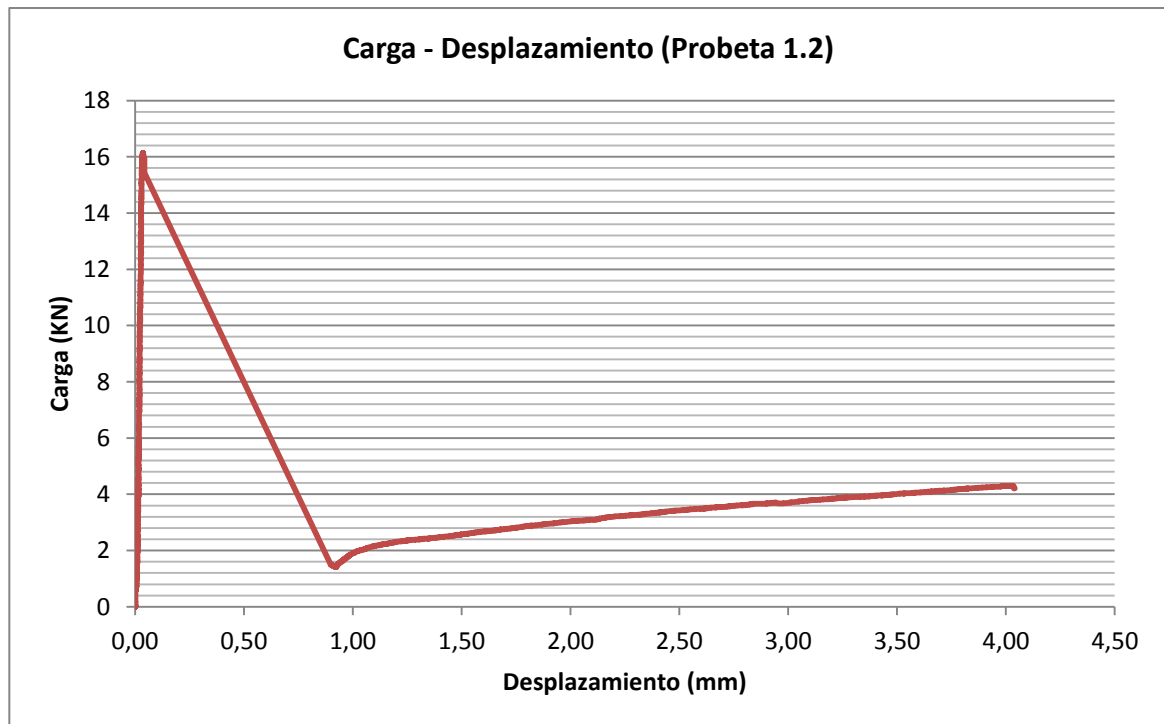


Figura 10.13 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 5 kg/m³)

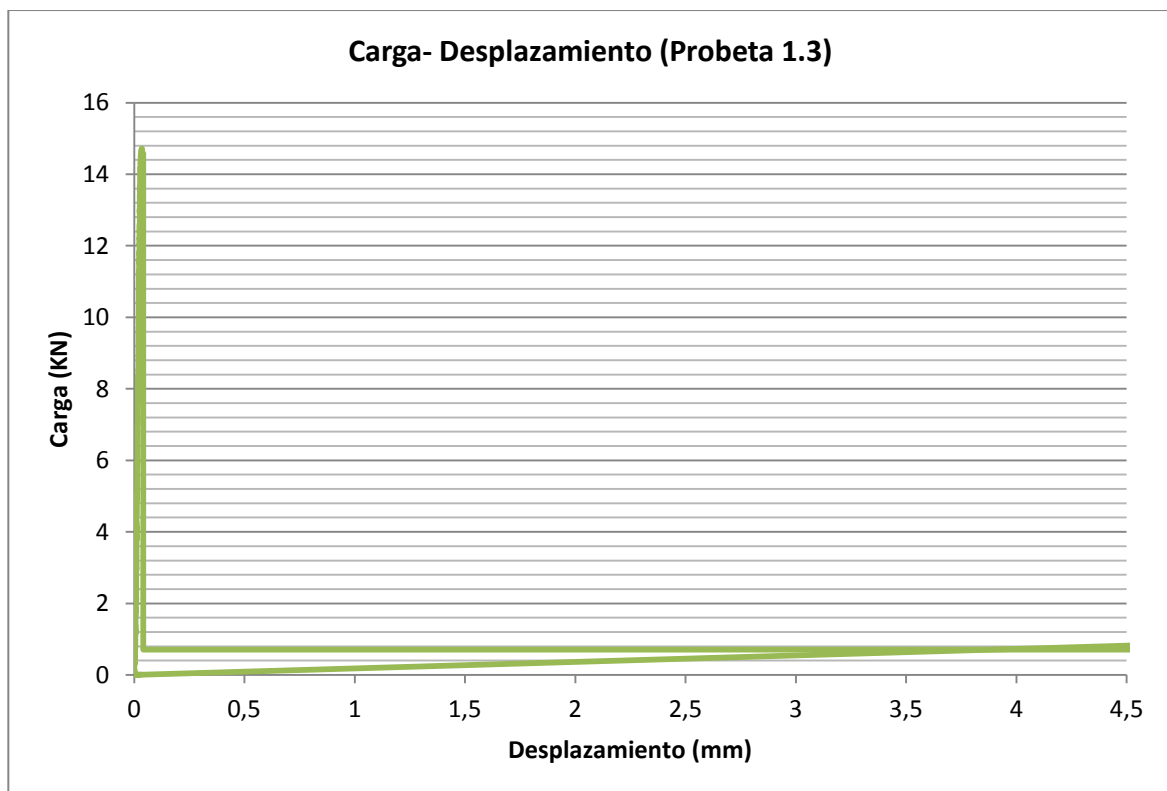


Figura 10.14 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 5 kg/m³)

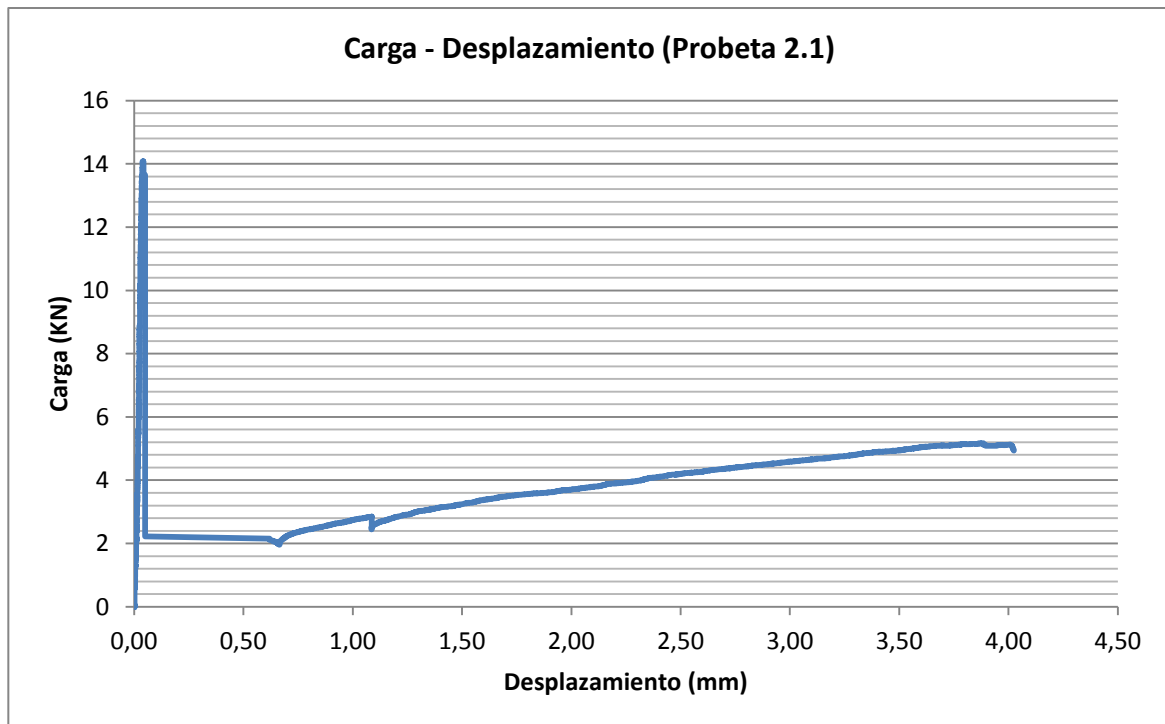


Figura 10.15 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 4 kg/m³)

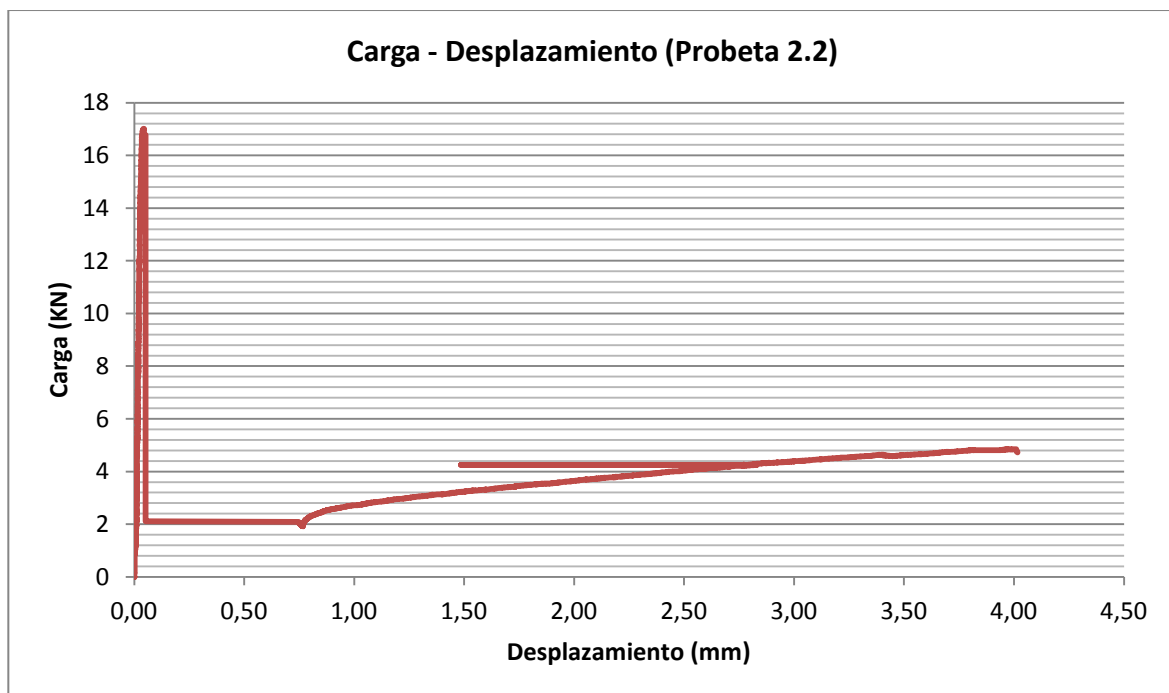


Figura 10.16 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 4 kg/m³)

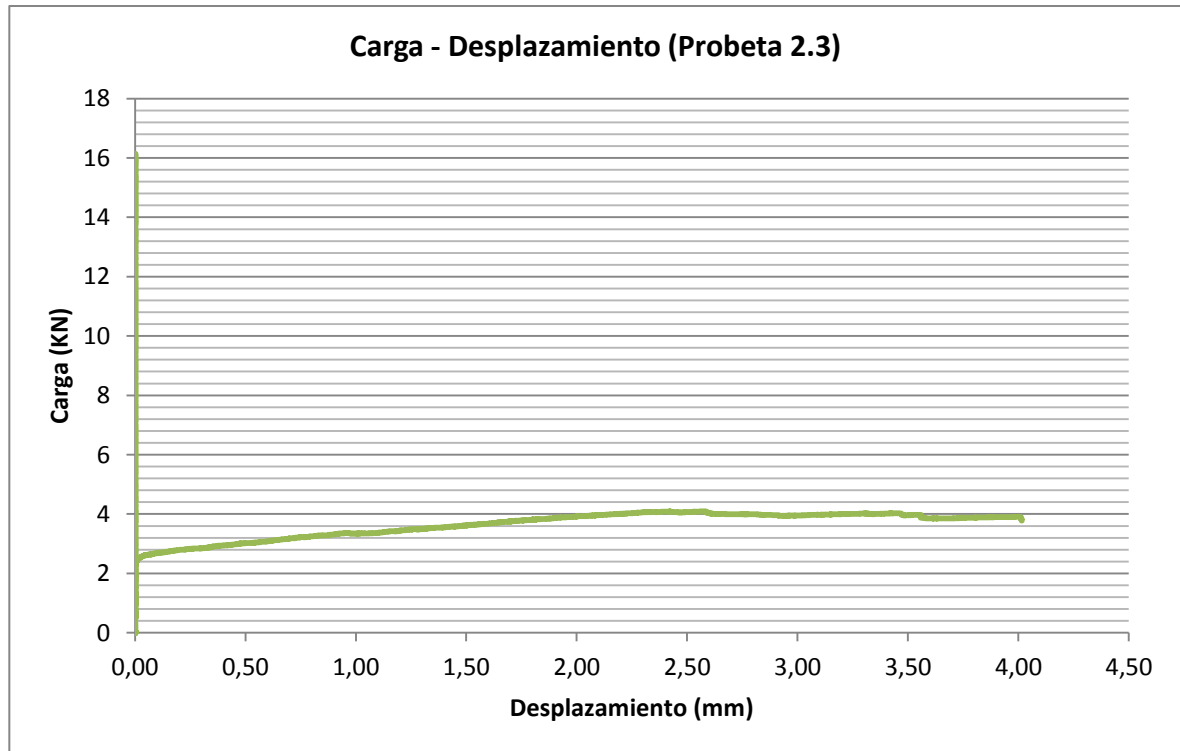


Figura 10.17 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 4 kg/m³)

10.4 FIBRAS PLÁSTICAS SIKA-FIBER M-48

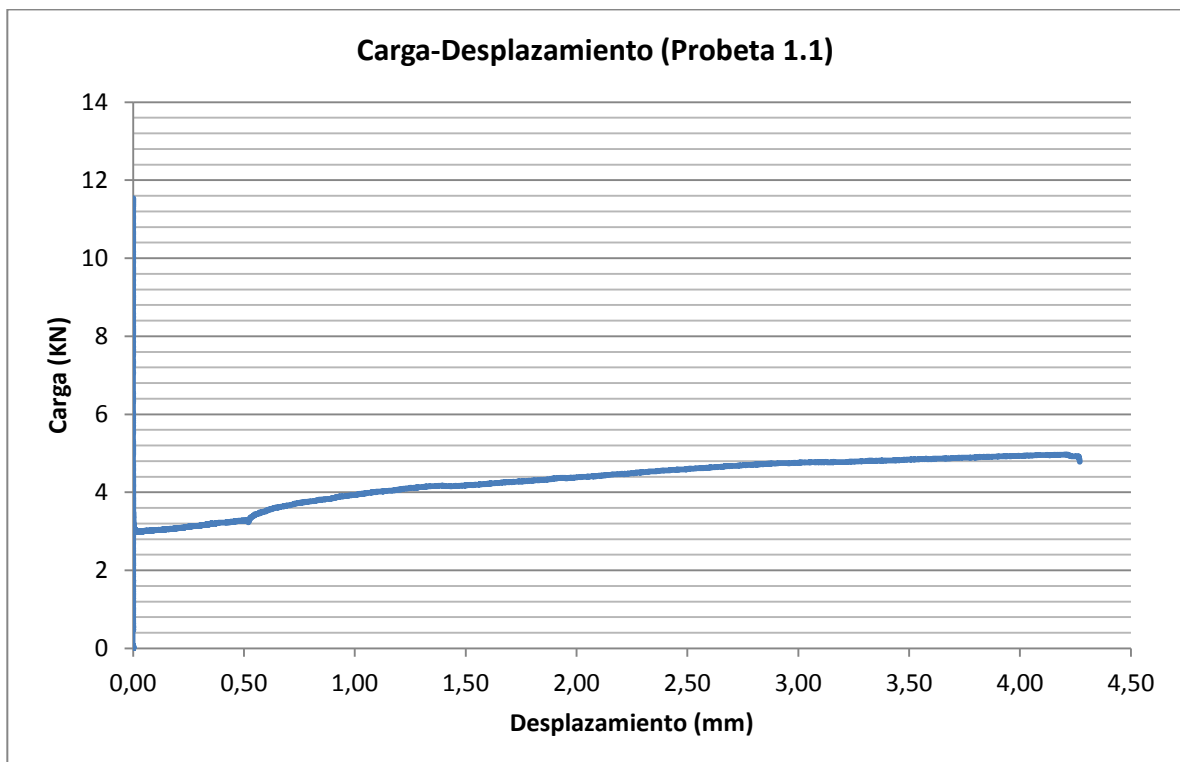


Figura 10.18 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 4 kg/m³)

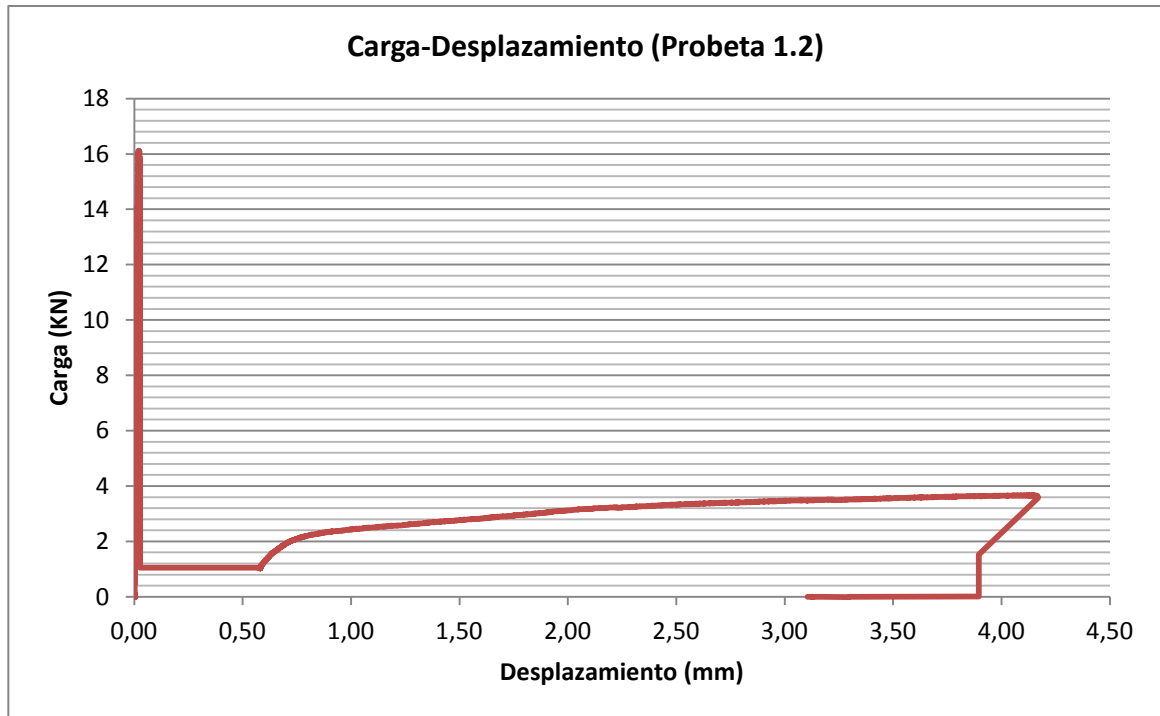


Figura 10.19 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 4 kg/m³)

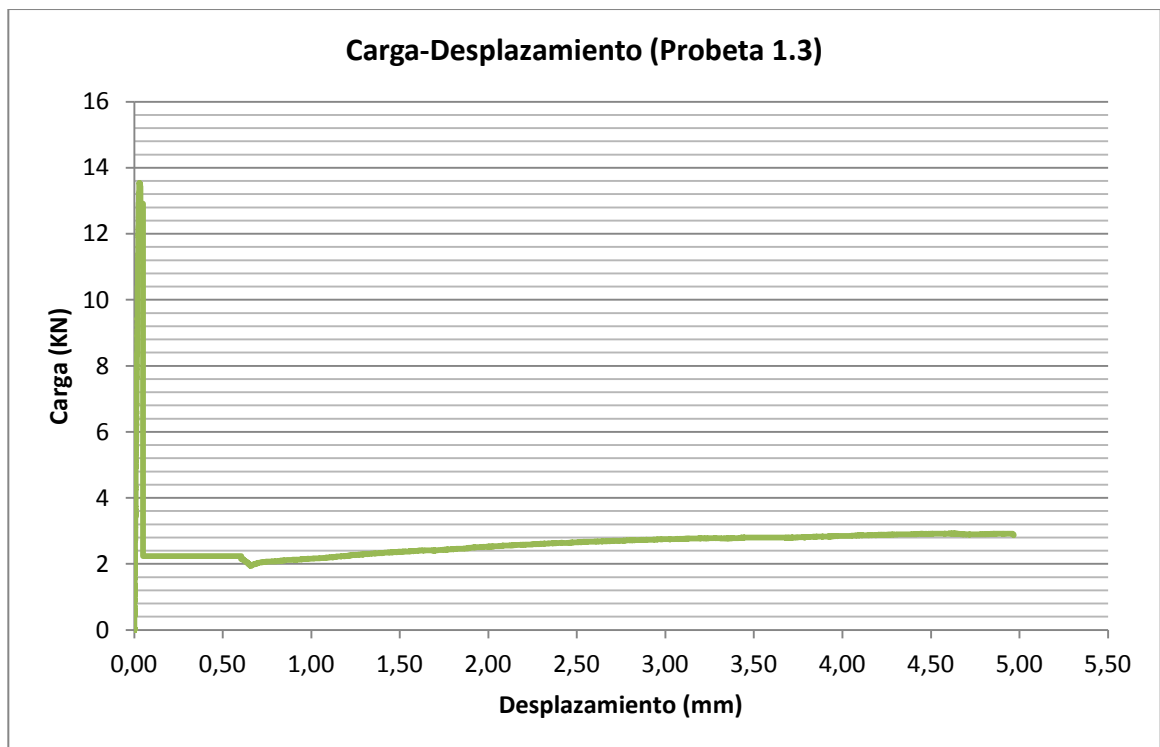


Figura 10.20 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 4 kg/m³)

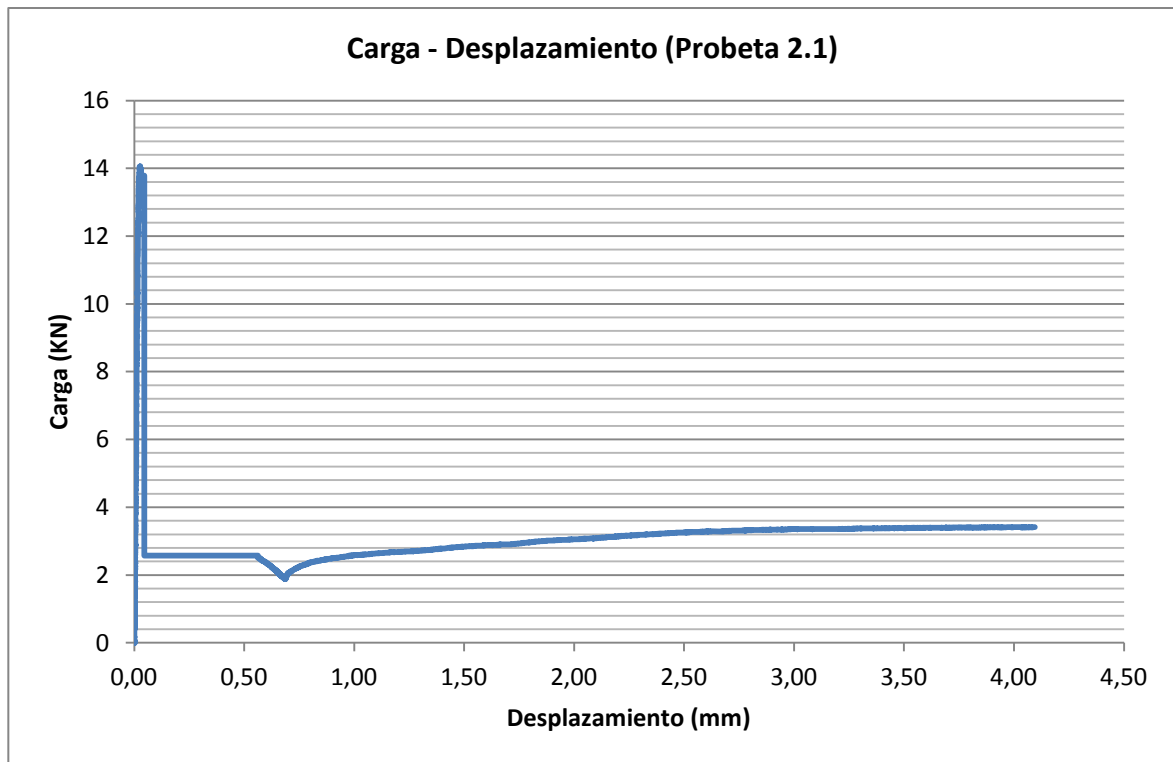


Figura 10.21 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 5 kg/m³)

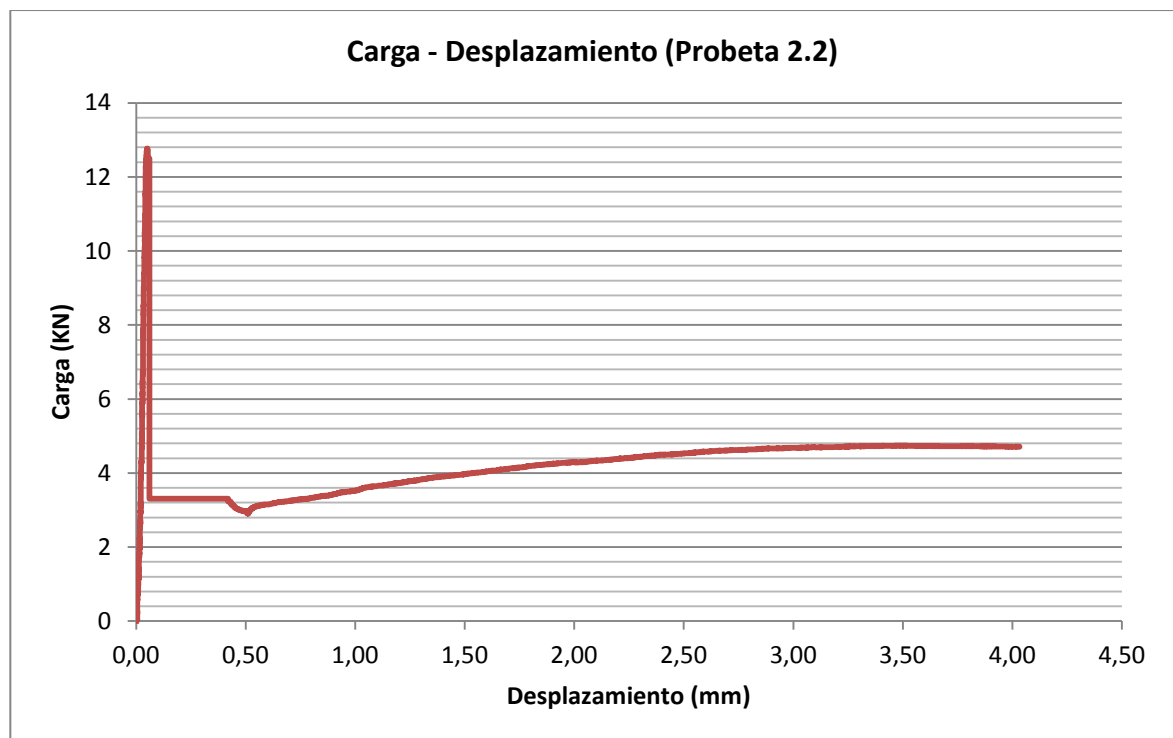


Figura 10.22 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 5 kg/m³)

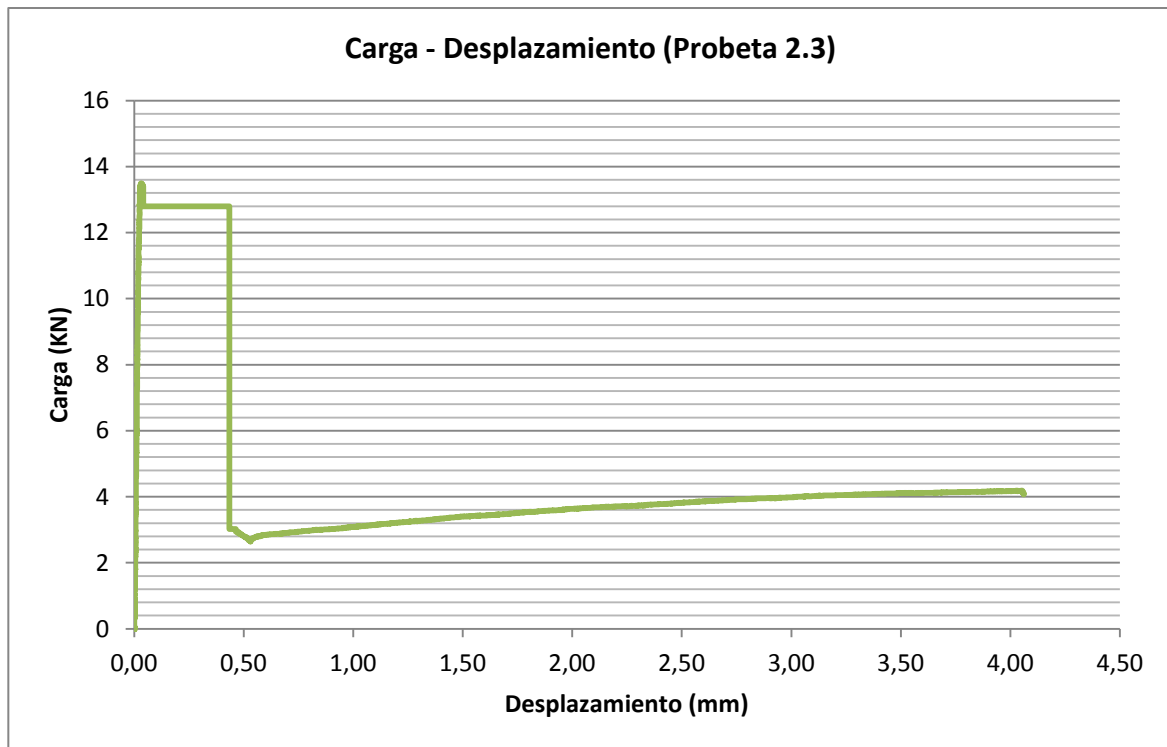


Figura 10.23 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 5 kg/m³)

10.5 FIBRAS DE VIDRIO

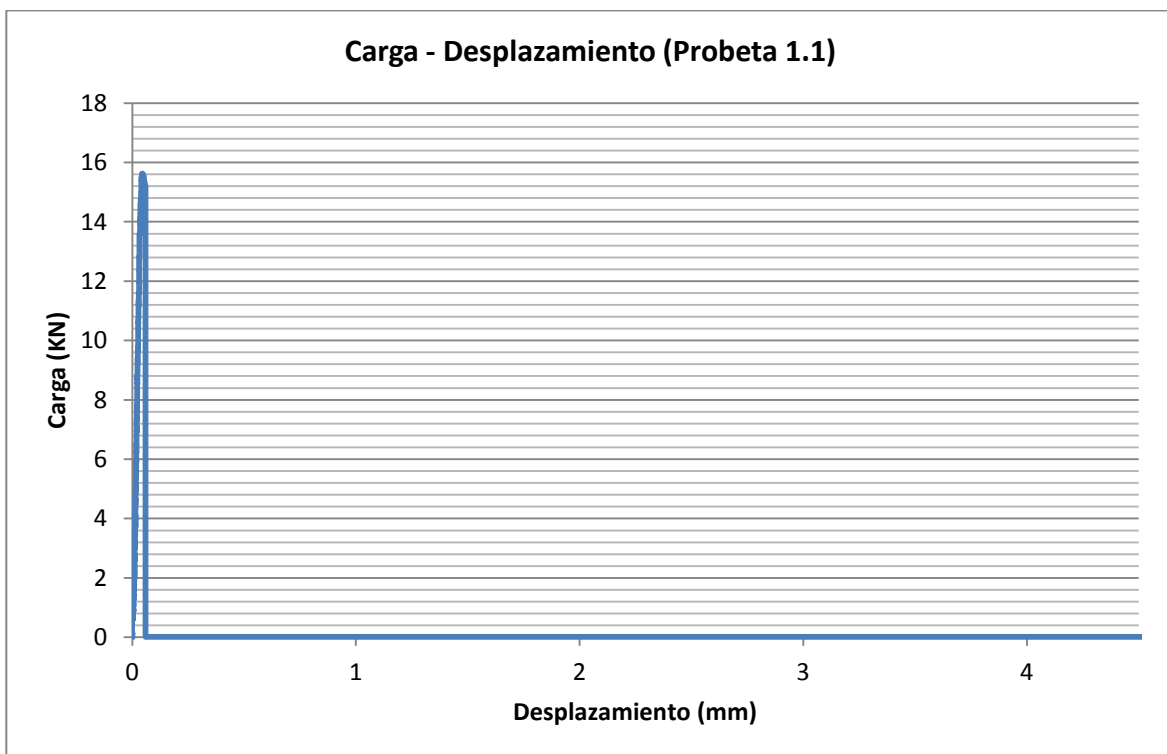


Figura 10.24 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 5 kg/m³)

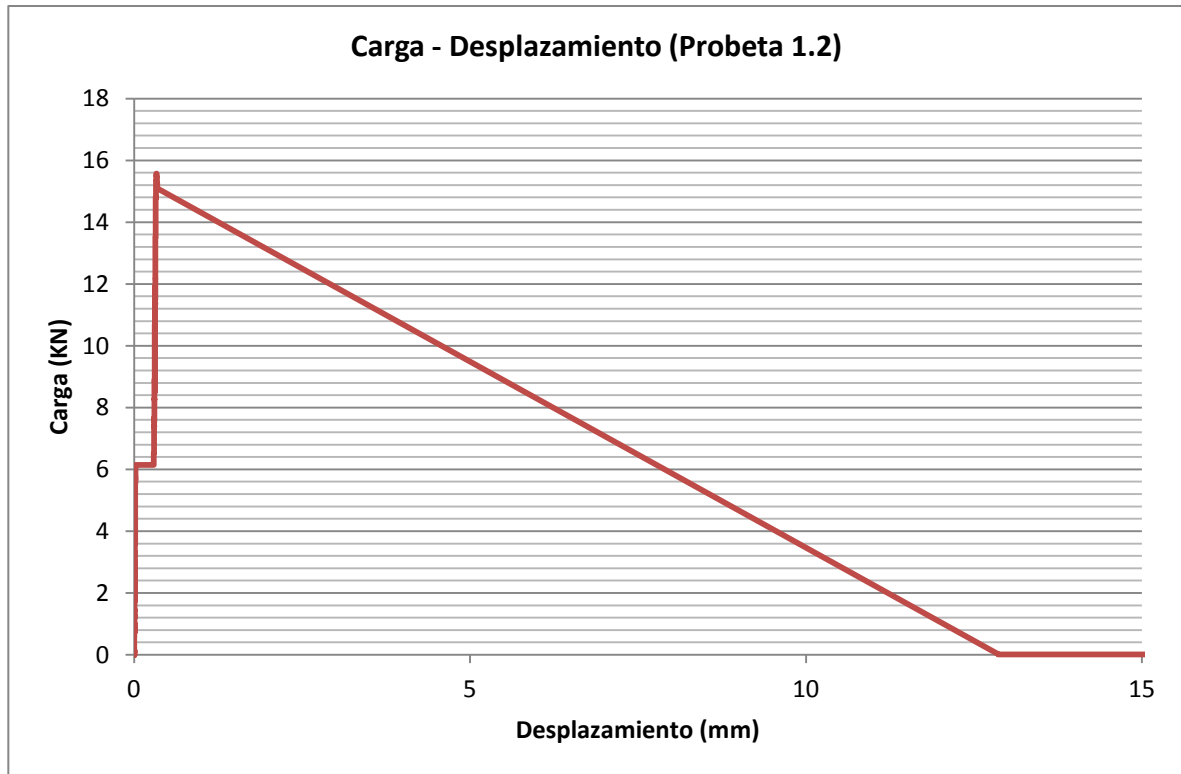


Figura 10.25 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 5 kg/m³)

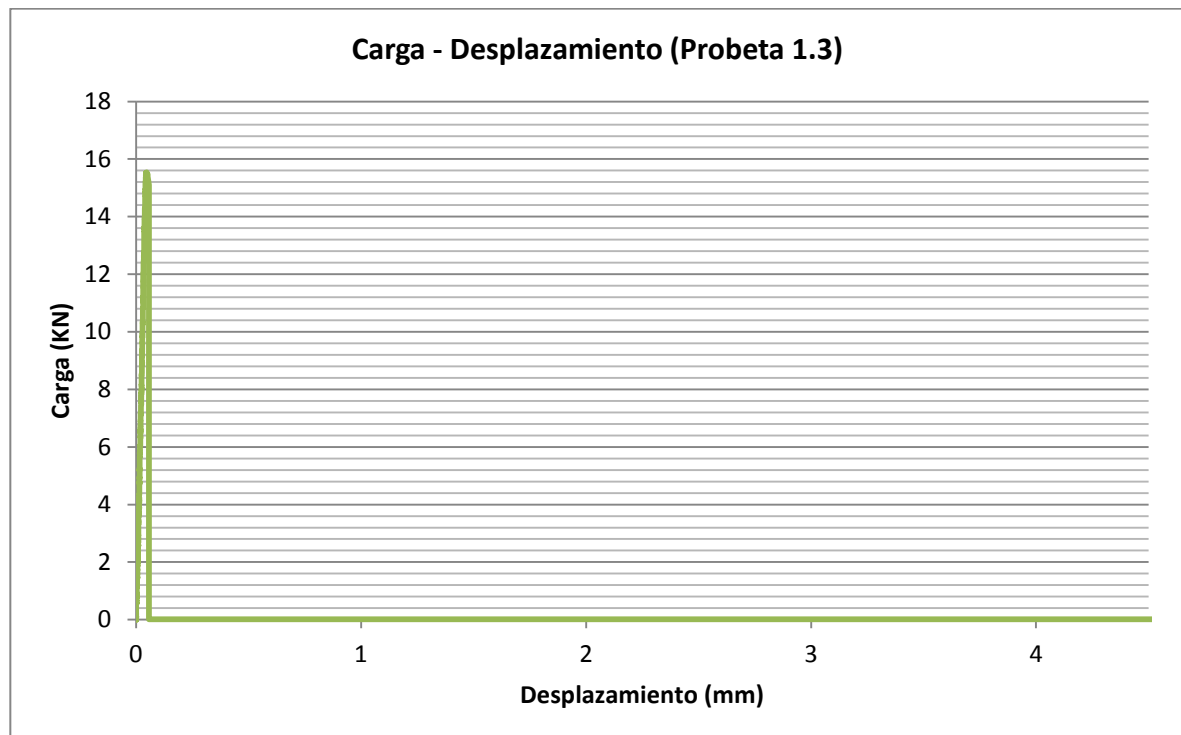


Figura 10.26 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 5 kg/m³)

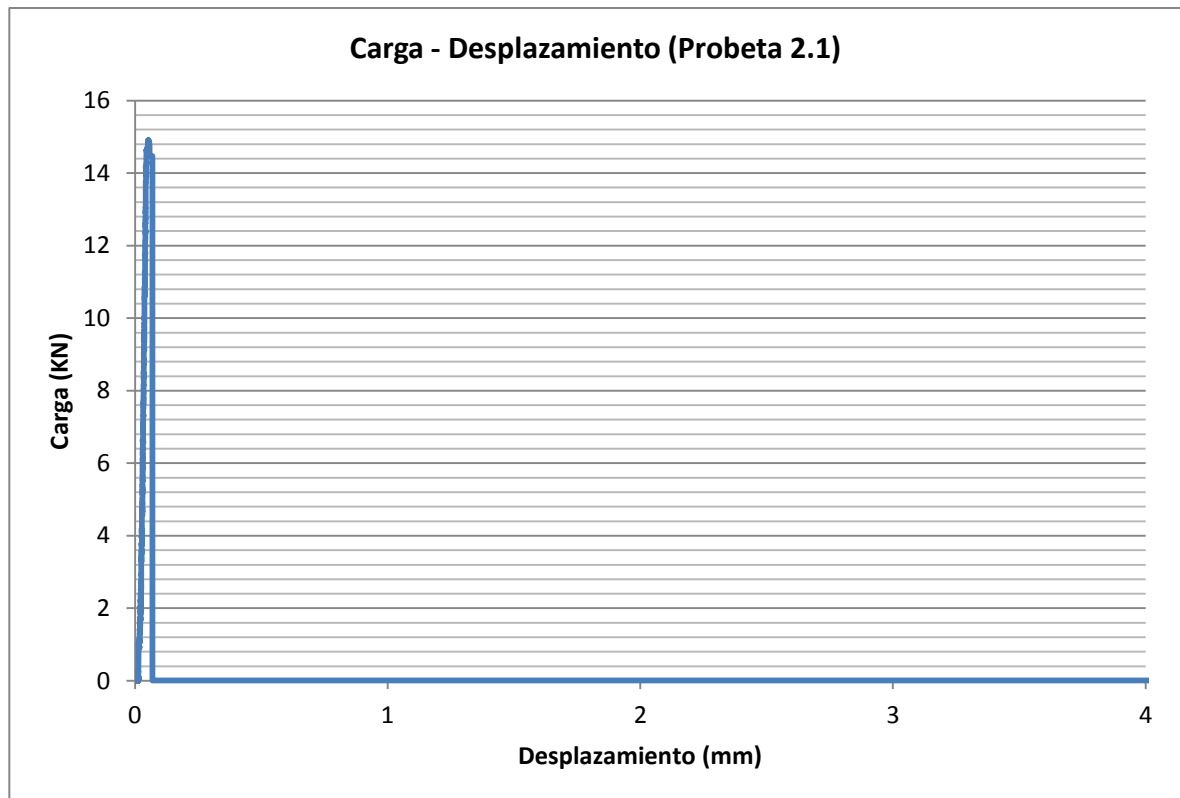


Figura 10.27 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 4 kg/m³)

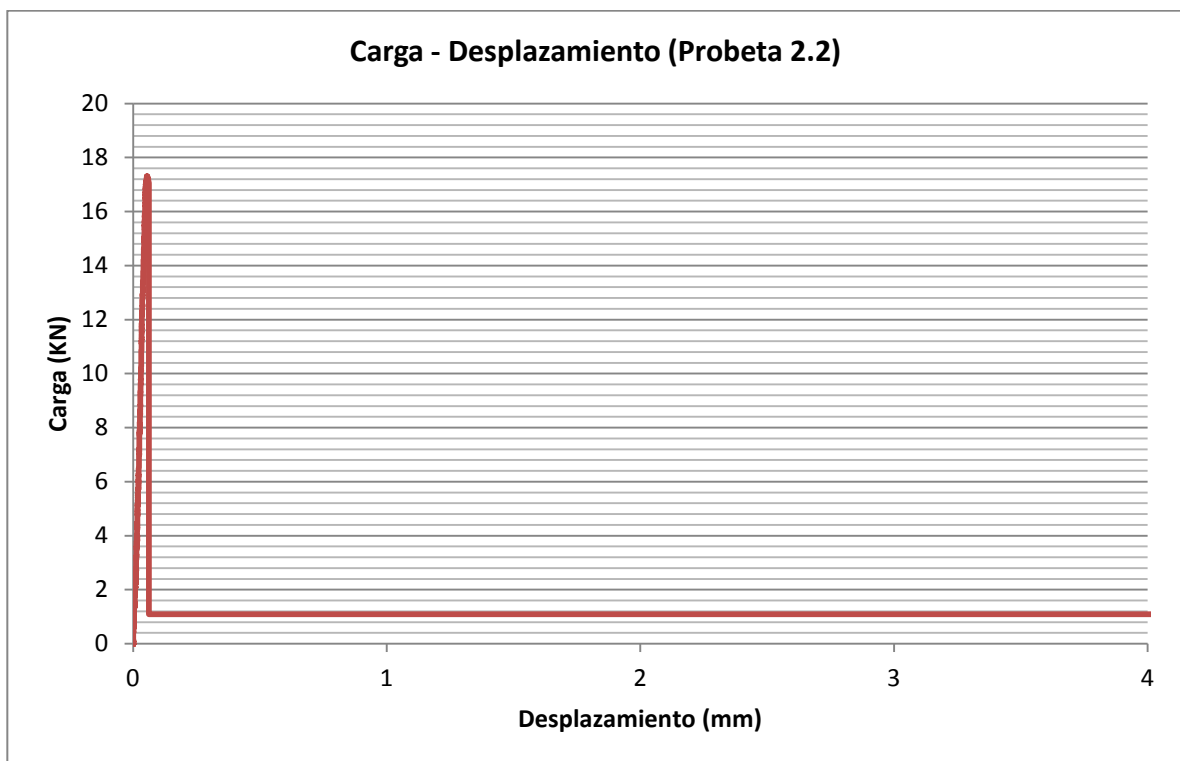


Figura 10.28 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 4 kg/m³)

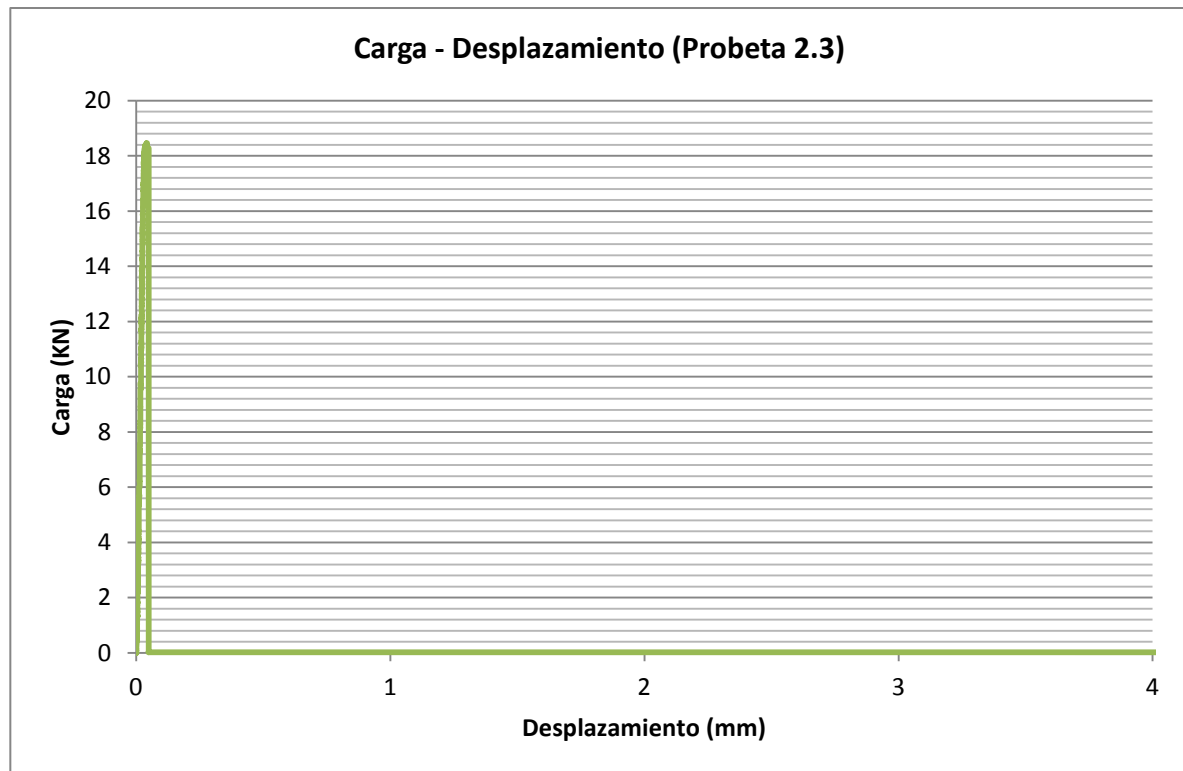


Figura 10.29 Gráfica Carga-Desplazamiento (Dosif. Fibras 4 kg/m³)

11 ANEJO DE NOMENCLATURA

f_{ck} (EHE) = Resistencia característica a compresión del hormigón, expresada en N/mm² (MPa).

$f_{R,1,k}$ y $f_{R,3,k}$ = Resistencia característica residual a flexotracción especificada, en N/mm².

$f_{R,j}$ = Resistencia residual a la flexión en tracción, $j = 1, 2, 3$ ó 4 .

$CMOD$ = Desplazamiento del borde de la fisura.

La resistencia residual a la tracción por flexión $f_{R,j}$ viene dada por la siguiente expresión:

$$f_{R,j} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2}$$

Donde;

$f_{R,j}$ es la resistencia residual a la tracción por flexión, correspondiente a $C MOD = CMOD_j$ o $\delta = \delta_j$ ($j = 1, 2, 3, 4$), en newtons por milímetro cuadrado.

F_j es la carga correspondiente a $CMOD = CMOD_j$ o $\delta = \delta_j$ ($j = 1, 2, 3, 4$), en Newtons.

l es la longitud de vano, en milímetros.

b es la anchura de la probeta, en milímetros.

h_{sp} es la distancia entre el fondo de la entalla y la parte superior de la probeta, en milímetros.

12 AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, nuestro más sincero agradecimiento a los directores de este proyecto, Manuel Pascual Guillamon y Pedro Serna Ros, por su atención, preocupación y dedicación.

En especial, queremos dar las gracias a Marta Roig Flores, por su esfuerzo, preocupación, dedicación, y por sus enseñanzas, quién más allá de lo profesional, se ha preocupado por nosotros y nos ha animado a seguir adelante.

Agradecer al personal técnico del laboratorio de materiales del Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil por cedernos sus instalaciones y herramientas a lo largo de la fase experimental de este trabajo, así como su tiempo y atención en los momentos necesarios.